

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Факультет геології, географії, рекреації і туризму

Кафедра фізичної географії та картографії

*До захисту допущено  
кафедрою фізичної географії та картографії  
протокол № \_\_\_\_\_ від \_\_\_\_\_*

завідувач кафедри \_\_\_\_\_ *Анатолій БАЙНАЗАРОВ*

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

Кваліфікаційна робота  
здобувача другого (магістерського) рівня вищої освіти

**МОДЕЛЮВАННЯ ІМОВІРНИХ ЗОН РИЗИКУ ВНАСЛІДОК  
РУЙНУВАННЯ ДАМБИ (НА ПРИКЛАДІ ТРАВ'ЯНСЬКОГО  
ВОДОСХОВИЩА)**

Спеціальність (спеціалізація)      106. Географія

Освітня програма                      Картографія, геоінформаційні системи і  
дистанційне зондування Землі

Виконавець                      \_\_\_\_\_ студент 2 курсу д.ф.з.о., групи ГД-21  
**Ілля ОТРЕШКО**

Науковий керівник                      \_\_\_\_\_ проф., д. геогр. н. **Віліна ПЕРЕСАДЬКО**

Харків – 2025

## ЗМІСТ

|  |    |
|--|----|
| ВСТУП .....  | 3  |
| РОЗДІЛ 1. ГІДРОТЕХНІЧНІ СПОРУДИ ВОДОСХОВИЩ І ВИВЧЕННЯ<br>РИЗИКІВ ЇХ РУЙНУВАННЯ .....                     | 5  |
| 1.1. Зарубіжний досвід вивчення зон ризику руйнування дамб водосховищ ....                               | 5  |
| 1.2. Вітчизняний досвід вивчення зон ризику руйнування дамб водосховищ ...                               | 10 |
| РОЗДІЛ 2. ДОСВІД СТВОРЕННЯ КАРТОГРАФІЧНИХ МОДЕЛЕЙ ЗОН<br>РИЗИКУ .....                                    | 14 |
| 2.1. Моделювання зон ризику у світовій картографічній практиці .....                                     | 14 |
| 2.2. Моделювання зон ризику в Україні .....  | 23 |
| РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ІМОВІРНИХ ЗОН РИЗИКУ ВНАСЛІДОК<br>РУЙНУВАННЯ ДАМБИ ТРАВ'ЯНСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА ..... | 34 |
| 3.1. Характеристика Трав'янського водосховища .....  | 34 |
| 3.2. Комп'ютерне моделювання наслідків руйнування дамби Трав'янського<br>водосховища .....               | 48 |
| 3.3. Розробка карт зон ризику внаслідок руйнування дамби Трав'янського<br>водосховища .....              | 58 |
| ВИСНОВКИ .....   | 68 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....   | 70 |

## ВСТУП

У неспокійні часи сьогодення не можна виключати жодних подій, які б могли суттєво вплинути на стан навколишнього середовища та на життя людей. Довгий час існувала впевненість, що російські війська не зруйнують дамби Каховської ГЕС, оскільки очевидними були масштабні і неповоротні наслідки такої катастрофи. Проте, 6 червня 2023 року окупаційні війська навмисно підірвали дамбу, що призвело до масштабного затоплення територій нижче за течією річки Дніпро, яке за площею становило близько 600 км<sup>2</sup>, охоплювало територію 80 населених пунктів, стало причиною термінової евакуації близько 40 тисяч осіб та щонайменше 300 випадків смерті, і призвело до збитків, що оцінюються у 14 мільярдів доларів США [28].

У Харківській області вже були прецеденти руйнування дамб водосховищ внаслідок бойових дій. Мова йде про Оскільське водосховище, дамбу якого було зруйновано у другій половині вересня 2022 року. Внаслідок цього було частково затоплено та підтоплено населені пункти, розташовані нижче за течією. Окрім цього, значного порушення зазнала місцева екосистема. Загальні збитки для природи та господарства оцінюються у близько 4 мільярдів гривень [42].

Особливість розташування Трав'янського водосховища полягає у тому, що, насамперед, воно знаходиться неподалік від російського кордону, і, водночас, за 20 кілометрів від міста Харків. Відповідно, через непередбачуваність військової обстановки існують доволі високі ризики повторення тут сценарію Оскільського водосховища. Тому важливим є не лише встановити, наскільки руйнування дамби Трав'янського водосховища вплине на найближчі населені пункти, але також і на місто Харків.

Головною метою дослідження є: розробити картографічну модель імовірних зон ризику внаслідок руйнування дамби Трав'янського водосховища.

Задачі, поставлені для досягнення мети дослідження, включають в себе наступне:

1. Встановити особливості розробки картографічних моделей зон ризику у світовій та вітчизняній науковій практиці, визначити сучасні тенденції цього напрямку.

2. Розглянути приклади картографічних моделей зон ризику, виконаних як зарубіжними, так і вітчизняними авторами, встановити спільні та відмінні риси, особливості підходів до укладання та оформлення карт.

3. За допомогою спеціалізованого комп'ютерного програмного забезпечення розробити модель зон ризику внаслідок руйнування дамби Трав'янського водосховища.

4. На основі створеної моделі розробити карти зон ризику внаслідок руйнування дамби Трав'янського водосховища, попередньо встановити потенційні коротко- та довготривалі наслідки руйнування дамби, розробити первинні рекомендації щодо превентивних заходів.

Об'єктом дослідження виступає Трав'янське водосховище, території, що його оточують, та території, що знаходяться нижче за течією річки Харків. Предмет дослідження – особливості картографування імовірних зон ризику внаслідок руйнування дамби Трав'янського водосховища.

Основними методами дослідження є аналіз статистичних джерел, математичні розрахунки, комп'ютерне та картографічне моделювання. В процесі виконання роботи використано відкриті джерела, а також фондові матеріали Харківського науково-дослідного інституту екологічних проблем (УКРНДІЕП), де раніше проходила виробнича практика.

В майбутньому передбачається створення карти, на якій будуть враховані зони підтоплення і затоплення, оцінені екологічні, соціально-економічні та інші ризики і наслідки. Також є перспектива удосконалення самої моделі шляхом використання більш точних даних та алгоритмів, застосування інших способів, засобів та сценаріїв моделювання.

## РОЗДІЛ 1. ГІДРОТЕХНІЧНІ СПОРУДИ ВОДОСХОВИЩ І ВИВЧЕННЯ РИЗИКІВ ЇХ РУЙНУВАННЯ

### 1.1. Зарубіжний досвід вивчення зон ризику руйнування дамб водосховищ

Дамби як гідротехнічні споруди відомі людству ще з третього тисячоліття до нашої ери [61]. Але у сучасній формі вони почали з'являтися від початку XIX століття, як наслідок активного розвитку промисловості (зокрема енергетики), в основному будучи частиною конструкції гідроелектростанцій. Саме з цього часового проміжку регулярно фіксуються випадки їх руйнування. Всесвітньо відомі інциденти, такі як аварія на дамбах Мальпассе (Франція, 1959 рік), Вайонт (Італія, 1963 рік), греблях Баньцяо (Китай, 1975 рік) і Тетон (США, 1976 рік) та багато інших були не тільки катастрофічними за своїми масштабами та наслідками, але і також стали стимулом для проведення ряду досліджень, пов'язаних із картографічним моделюванням подібних явищ.



Рис. 1.1. Кількість інцидентів з руйнуванням дамб, що понесли за собою людські жертви, з 1850-х років і до сьогодні [54]

Перші напрацювання у цій сфері належать Т. МакДоналду та Дж. Лангрідж-Монополіс, які у своїй праці «Breaching Characteristics of Dam Failures» 1984 року [1] звернули увагу на недостатню точність при комп'ютерних розрахунках як місць прориву дамб, так і приблизної траєкторії водного потоку, і, проаналізувавши 42 відомі випадки прориву дамб, розробили власну основу для більш точних розрахунків, зокрема, для оцінки пікової швидкості водного потоку, залежно від розміру зруйнованої частини та часу, за який відбувається руйнування. Їх напрацювання стали класичною основою для розробки подальших моделей, в тому числі і картографічних. Варто зазначити, що наукові праці, пов'язані з аналізом руйнування дамб присутні у науковому середовищі ще з початку ХХ століття, але вони не були пов'язані саме з темою моделювання, втім, все одно вони дають значні обсяги інформації про характер руйнувань та перші спроби оцінити зони ризику, що виникають при таких катастрофах. Девід Фройліч у своїй статті «Embankment Dam Breach Parameters and Their Uncertainties» [2] використовує більш широку вибірку (72 випадки руйнування дамб) для розробки більш точних моделей визначення розмірів та конфігурації місць прориву, і, відповідно, для більш точної оцінки швидкості та напрямку водного потоку. Робота М. Пірс «Predicting peak outflow from breached embankment dams» [3] 2010 року проводить огляд існуючих регресійних відношень (лінійних, криволінійних та множинних), що необхідні для математичних розрахунків пікових показників потоку, також включає в себе спроби покращити формули за рахунок більш широкої бази реальних інцидентів.

Руйнування дамб з різних причин продовжується і у наш час. В період з 2000 по 2009 рік зафіксовано понад 200 випадків значних руйнувань, втім, завдяки впровадженню більш сучасних заходів безпеки, які стали можливі в тому числі за рахунок результатів наукових досліджень, пов'язаних із моделюванням зон ризику, значно зменшилася кількість жертв та економічних збитків внаслідок таких інцидентів. Більш сучасні дослідження спираються на широке застосування комп'ютерного моделювання прориву дамби, зокрема завдяки

різним видам програмного забезпечення, яке не обмежується відомими всім ArcGIS або QGIS, а також і більш спеціалізованими програмами, що використовуються у гідроінженерній справі, зокрема HEC-RAS, TUFLOW, MIKE-Flood, 3D-Flow.

Ще 2000 року у статті «A simple raster-based model for flood inundation simulation» [4] П. Бейст та А. Де Роо описали нову модель для комп'ютерної симуляції повені, засновану на цифровій моделі рельєфу із різною роздільною здатністю (100, 50, 25 метрів), на прикладі річки Маас у Нідерландах, де відбулася велика повінь у 1995 році. У результаті, модель показала високий рівень точності результатів – понад 80% змодельованої території затоплення відповідало реальним показникам. Особливістю було те, що дана модель є набагато простішою, ніж ті, що використовувалися раніше, відповідно, це зменшувало час, необхідний на процес моделювання, водночас зробивши доступнішою технологію 1-D і 2-D моделювання водних потоків, що значно прискорило розвиток не лише цього напрямку, але і загалом розвиток галузі інженерно-гідрологічних досліджень.

Якщо говорити про більш сучасний етап, у роботі «Empirical and semi-analytical models for predicting peak outflows caused by embankment dam failures» [5] 2018 року Б. Ванг та ін. проводили розробку та порівняння кількох емпіричних та напіваналітичних моделей для прогнозу пікових показників потоку саме при катастрофічному руйнуванні дамб. У результаті це дослідження показало сильні та слабкі сторони сучасних формул, і відкрило більше можливостей для подальшого їх вдосконалення та адаптацію під різні види дамб.

Д. Верма у дослідженні «Design for the prediction of peak outflow of embankment dams» [6] 2023 року розглядає існуючі та розробляє власну модель для прогнозування показників пікового потоку внаслідок прориву на водно-інженерних спорудах, в тому числі і на дамбах. У результаті, отримана модель показує високу результативність для різних видів дамб, у порівнянні з аналогічними моделями, розробленими у 1998 та 2004 роках.

Дослідження «Probabilistic mapping and sensitivity assessment of dam-break flood hazard» [7] С. Ріццо, А. Маранцоні, М. Д'Орсіа пропонує методологію побудови ймовірнісних карт повеней внаслідок варіації параметрів прориву (ширина прориву, рівень води у водосховищі). Додатково проводиться аналіз чутливості формул розрахунку під впливом широкої варіації вхідних параметрів, що дає змогу ідентифікувати саме ті параметри, які найбільше впливають на підсумкові показники, і також ті діапазони параметрів, що підвищують чутливість результатів розрахунків. Ця робота яскраво ілюструє сучасний процес переходу від детерміністичних карт до карт з ймовірностями, що набагато більше відповідає актуальним на сьогодні підходам до управління ризиками. Загалом, у доробку цього колективу авторів є чимало інших змістовних робіт, пов'язаних саме з темою картографування зон ризику, які розглядатимуться у наступних розділах.

Важливим для розуміння методики та сучасних особливостей моделювання зон ризику є робота колективу дослідників на чолі з Ч. Мо та ін., під назвою «Simulation of one-dimensional dam-break flood routing with HEC-RAS — case study» [8], що на реальному прикладі басейну річки Ченгбі (Китай) показує ключові переваги та недоліки одновимірного (1D) моделювання напрямку водного потоку при руйнуванні дамби, проводить порівняння різних сценаріїв, залежно від внутрішніх та зовнішніх чинників, та є джерелом практичних порад щодо налаштування процесу моделювання всередині програмного середовища HEC-RAS (введення геометричних та фізичних параметрів дамби, її прориву, гідрографу річки, початкових та граничних умов). Проводиться порівняння з двовимірним (2D) моделюванням аналогічних сценаріїв, звертається увага на переваги та недоліки кожного з методів.

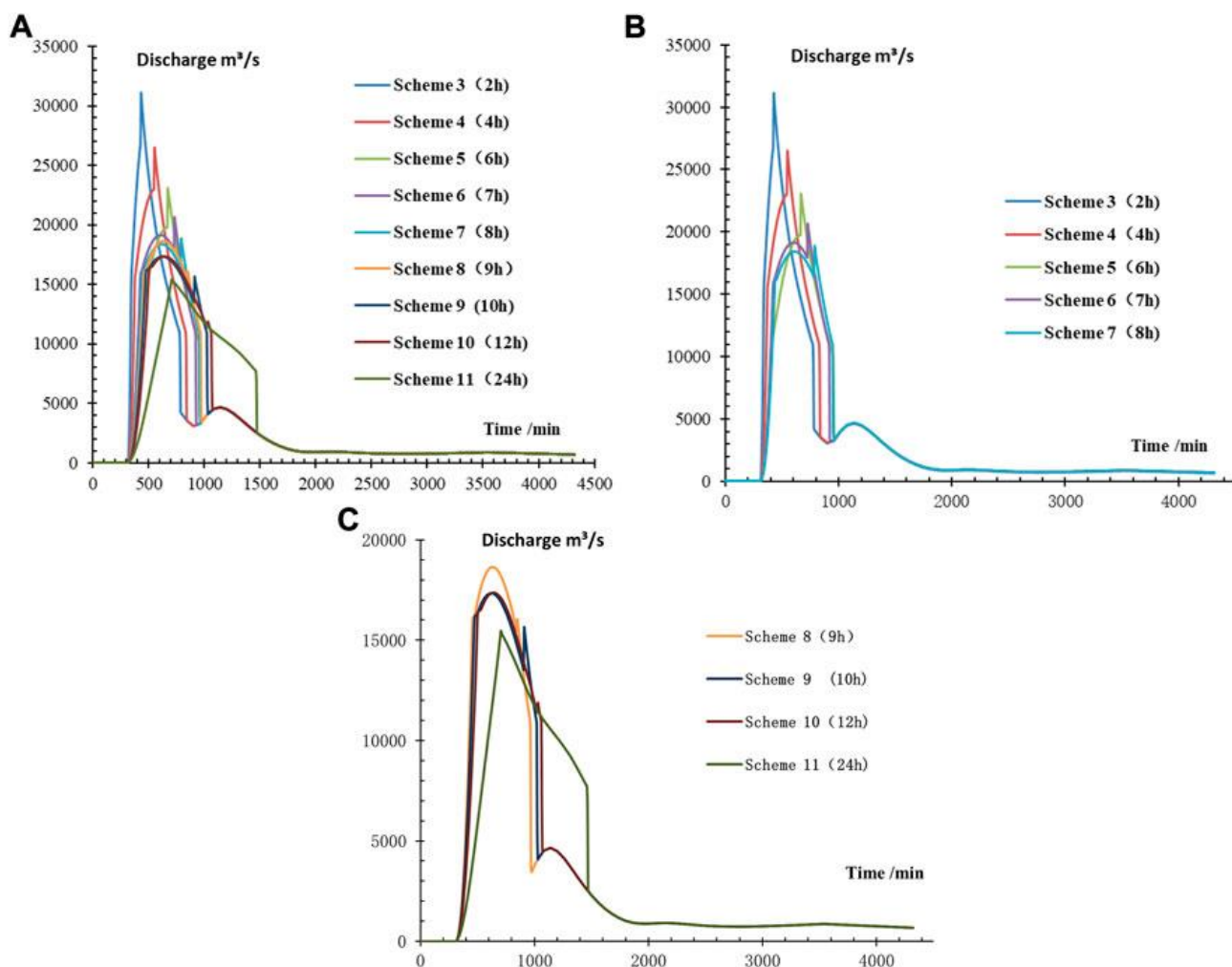


Рис. 1.2. Гідрограма швидкості течії води при симуляції руйнування дамби, з використанням 11 різних сценаріїв одновимірного моделювання. Автори: Ч. Мо, У. Шен та ін. [8]

Збірник статей «Advances in Dam-Break Modeling for Flood Hazard Mitigation» [9] за редакцією Ф. Аурелі, А. Маранцоні та Г. Петачча є гарним джерелом, що проводить огляд сучасних тенденцій у моделюванні наслідків руйнування дамб та зон ризику затоплення, включає у себе розділи, пов'язані із математичним моделюванням, рівняннями потоку води, картографуванням зон затоплення, аналізом існуючих та майбутніх імовірних інцидентів, проводиться розгляд впливу затоплення на території житлової та господарської забудови.

## 1.2. Вітчизняний досвід вивчення зон ризику руйнування дамб водосховищ

Як можемо бачити, питання моделювання зон ризику внаслідок руйнування дамб продовжує мати високий рівень актуальності у зарубіжних дослідженнях, проте у вітчизняній практиці останніх років воно тільки починає висвітлюватися. В основному це спричинено масштабними наслідками руйнування дамби Каховської ГЕС, що стимулювало саме вітчизняних дослідників звернути увагу не лише на моделювання таких наслідків, але і розгляд імовірних сценаріїв у випадку схожих катастроф в майбутньому. Зокрема, монографія «Вплив російської агресії на стан природних ресурсів України» [10] авторства В.П. Строкаль та ін. дуже широко описує хід подій, зафіксовані показники зміни рівня води, особливості території, що була затоплена, відбувається детальна оцінка наслідків катастрофи, зокрема для показників якості води, біологічних ресурсів територій, сільського господарства, звертається увага на потенційне загострення економічних та гуманітарних проблем. Також ця робота містить великий обсяг картографічних матеріалів, які можуть слугувати гарним прикладом візуалізації зон ризику. Окрім Каховської ГЕС, монографія містить важливу інформацію щодо руйнування дамб Оскільського та Печенізького водосховища, що дає уявлення про подібні катастрофи саме в межах Харківської області. Робота «Затоплення та підтоплення територій: ризику для водної та продовольчої безпеки регіонального рівня» [11] авторів Строкаль В.П., Шевчук С.А. більш детально розкриває тему наслідків саме від затоплення територій, в тому числі і від руйнування дамб водосховища.

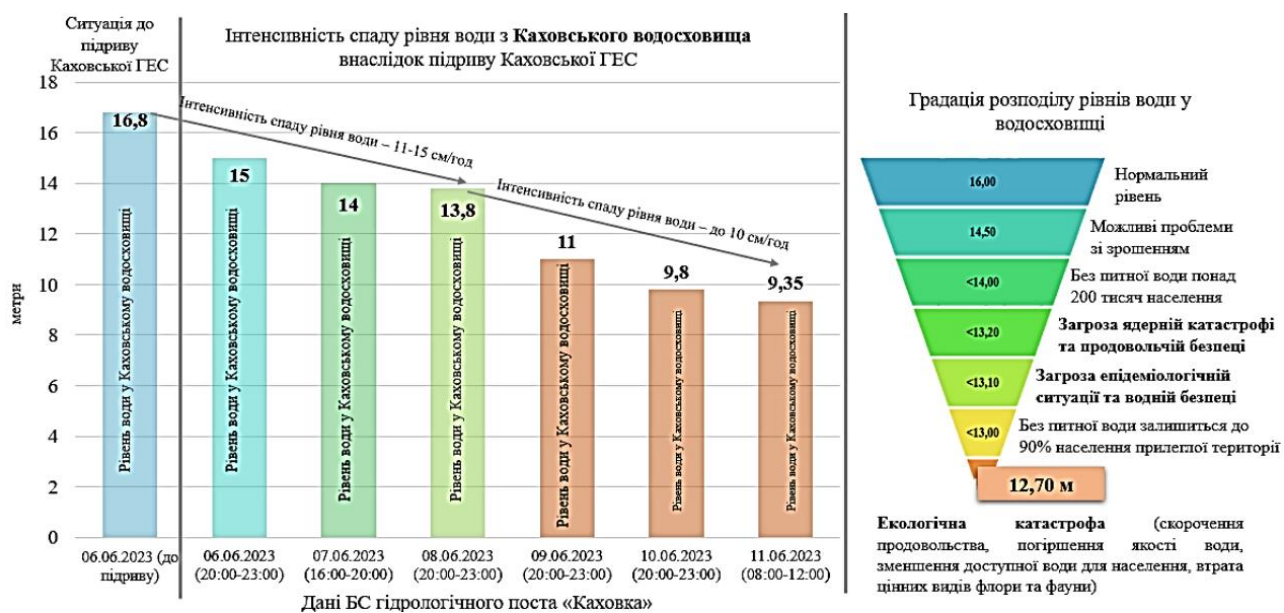


Рис. 1.3. Рівень води у Каховському водосховищі на позначці у створі гідрологічного поста «Каховка», що характеризує інтенсивність спаду рівня води. Автори: Строкаль. В.П., Шевчук С.А. [10]

Ще одна важлива робота від вітчизняних авторів, це стаття «Destruction of the Kakhovskaya hydroelectric power plant: the second aspect of the ecological catastrophe» [12] авторства В. Стародубцева та М. Ладики. В ній мова також іде про руйнування греблі Каховської ГЕС, наведено детальний ретроспективний аналіз, порівняння із руйнуванням дамби Дніпровської ГЕС часів Другої Світової війни, порівняння космічних знімків до та після катастрофи, оцінка довготривалих наслідків та перспектив відновлення водосховища.

Робота колективу авторів під керівництвом О. Шумілової «Impact of the Russia–Ukraine armed conflict on water resources and water infrastructure» [13] звертає увагу в першу чергу саме на вплив військових дій на водні ресурси та інфраструктуру, оцінює наслідки руйнувань, та пропонує ряд заходів для зменшення негативного впливу від подібних інцидентів. Дається огляд не лише для випадку із Каховською ГЕС, але і на інші інциденти, що траплялися на території України внаслідок російського вторгнення.

Щодо робіт, які прямо пов'язані з моделюванням зон ризику, у відкритому доступі є дуже мала кількість джерел, що розкривають питання саме в контексті України, а подібних робіт вітчизняних науковців поки відстежити не вдалося.

Тим не менш, навіть обмежені джерела дають змогу отримати комплексне уявлення про моделювання зон ризику в результаті руйнування дамби водосховища. Так, Б. Агербік, М. Кнепфле, Ф. Вітсенбург та С. Йонкман у дослідженні «Near Real-time Flood Risk Modelling in Response to Increasing Uncertainties in Flood Predictions» [14] проводять детальне моделювання висоти повені, та просторово-часове моделювання надходження припливної хвилі, і порівнюють ці результати з реальними наслідками. Для створення комп'ютерної моделі використовується платформа Tugron, а у якості математичної моделі використовуються рівняння Сан-Венана для двовимірних розрахунків швидкості потоку та висоти повені. На даний момент це найбільш повна і точна робота, пов'язана із темою цього дослідження.

Інша робота, пов'язана з темою катастрофи на Каховській ГЕС, належить авторам П. Кадам, П. Тхакур, С. Двіведі, В. Гарг та П. Дхот «Dam Breach Analysis and Damage Assessment of Nova Kakhovka Dam using Satellite data and 1D and 2D Hydrodynamic Modeling» [15]. У цьому випадку, моделювання відбувається через програмне забезпечення HEC-RAS, без використання математичних моделей, при цьому створюється кілька комп'ютерних моделей, залежно від параметрів прориву дамби, щоб продемонструвати, наскільки відрізняються наслідки, залежно від розміру прориву. Окрім цього, оцінюються реальні наслідки затоплення, і так само йде порівняння моделей з реальними показниками, які можна побачити на космічних знімках.

Цікава робота від вітчизняних авторів М.М. Біляєв та В.В. Козачина – «Моделювання динаміки ґрунтових вод та їх забруднення» [16], яка хоч і не стосується безпосередньо моделювання зон ризику, проте є важливою для розуміння наслідків, спричинених затопленням, зокрема, забруднення та зміна рівня ґрунтових вод, і також використовується для прогнозування довготривалого ефекту у ряді досліджень, пов'язаних із моделюванням зон ризику при затопленні територій.

Підсумовуючи, бачимо, що тема моделювання зон ризику набула значного розвитку у світовій науковій спільноті, об'єднуючи між собою спеціалістів у сфері гідрології, інженерії, картографії, ландшафтного планування, комп'ютерних технологій, і ставить перед собою багато задач, пов'язаних із попередженням та зменшенням негативного впливу на господарську та життєдіяльність катастроф, пов'язаних із руйнуванням дамб. В Україні сфера моделювання зон ризику продовжує розвиватися, і має під собою доволі значне підґрунтя завдяки ряду важливих досліджень та робіт, багато в чому завдяки співпраці вітчизняних науковців із міжнародними організаціями. Фактично, в Україні є великий простір для дослідницької діяльності саме у цій сфері, чим активно користуються як вітчизняні, так і зарубіжні спеціалісти.

## РОЗДІЛ 2. ДОСВІД СТВОРЕННЯ КАРТОГРАФІЧНИЙ МОДЕЛЕЙ ЗОН РИЗИКУ

### 2.1. Моделювання зон ризику у світовій картографічній практиці

Укладання карт зон ризику у випадку руйнування дамби є важливим з точки зору прогнозування змін та оцінки реальних наслідків катастрофи, в першу чергу для підготовки превентивних заходів, а також для інформування населення, проведення економічного та ландшафтного планування територій. Розвиток картографування зон ризику також можна розглядати як один із чинників, що запобігає великій кількості жертв під час таких інцидентів та дозволяє мінімізувати збитки для населення та економіки.

У світовій практиці існує декілька джерел для стандартизації у картографуванні зон ризику. Перше – це сучасний посібник «Inundation Mapping of Flood Risks Associated with Dam Incidents and Failures» або FEMA P-946 [17], розроблений федеральною комісією з управління енергетикою США. У ньому присутні шаблони карт та рекомендації щодо їх оформлення. Цей документ є одним з головних орієнтирів у міжнародній інженерно-картографічній практиці. Друге джерело – це технічні звіти USBR (Бюро рекламації США), зокрема звіт «Prediction of Embankment Dam Breach Parameters. A Literature Review and Needs Assessment. Dam Safety Research Report. DSO-98-004» [18] авторства Т. Вол. Він, разом з кількома іншими звітами (наприклад, PAP-1018) проводять огляд методів прогнозування параметрів прориву, та містять практичні рекомендації щодо моделювання прориву дамби (включно з вибором формули прориву і налаштуванням моделі). Третім джерелом є технічні бюлетені, розроблені Міжнародною комісією по великих дамбах (ICOLD) [19], що надають ряд рекомендованих стандартів щодо можливостей, обмежень і потреб у деталізації моделювань для різних категорій дамб.

Різні спеціалісти та різні установи по всьому світу використовують різні методи та засоби для укладання карт зон ризику, проте існує загальний підхід до методології цього процесу, що описаний у Таблиці 2.1.1.

Таблиця 2.1.1.

## Методологія укладання карт затоплення

| № п.п. | Назва етапу  | Методи  |
|--------|--|---|
| 1      | Оцінка параметрів прориву  | Емпіричні формули: MacDonald, Costa, Froehlich; USBR/USACE                    |
| 2      | Створення лінійного графіку прориву (гідрограма)                       | Microsoft Excel або аналогічне програмне забезпечення                         |
| 3      | Гідродинамічне моделювання (1D/2D/3D)                                  | Програмне забезпечення: HEC-RAS, MIKE 21/MIKE Flood, Delft3D/TELEMAC, Flow 3D |
| 4      | Перетворення моделей у картографічні шари                              |   |
| 5      | Порівняння та корекція за космічними знімками, польовими дослідженнями | Геоінформаційні системи: ArcGIS, QGIS; інструменти HEC-GeoRAS, RAS Mapper     |
| 6      | Оформлення готових карт  |   |

На сьогодні у світовій практиці виділяють такі найпоширеніші види картографічних продуктів, пов'язаних із моделюванням зон ризику:

1. Статичні карти затоплення (single-scenario extent) – найпоширеніші на сьогодні, показують просторове охоплення в умовах заданого сценарію (повне руйнування / переповнення). Вони використовуються здебільшого для інформування громадськості і створення планів евакуації.

2. Глибинні карти (depth grids / depth polygons) – потрібні для оцінки пошкоджень будівель, інфраструктури, для визначення зон загрози життю населення, часто грають ключову роль у прийнятті рішень щодо можливостей евакуації населення із зон ризику.



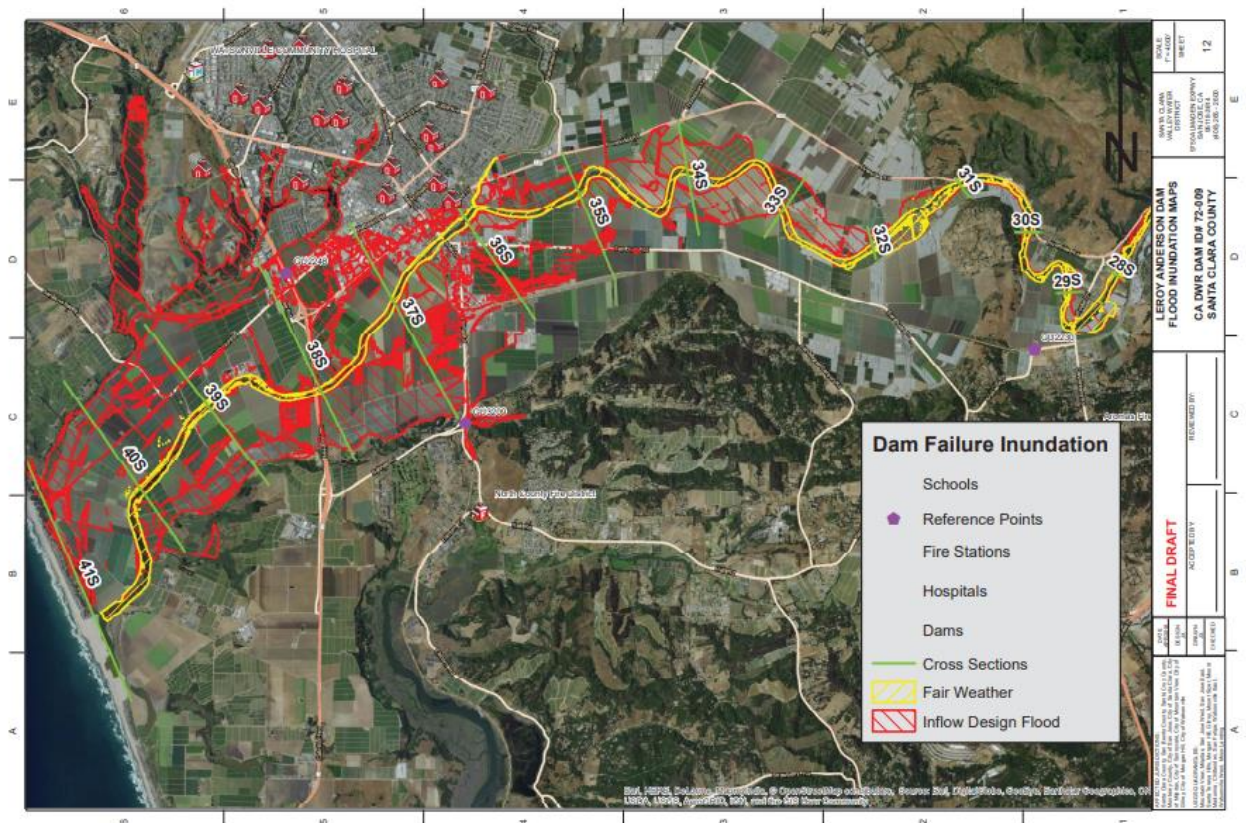


Рис. 2.1.2. Карта «Leroy Anderson Dam Flood Inundation Sheet 12» із серії карт «Anderson Dam (Valley Water, California) – Inundation maps» 2016 [20]

Серія карт «Anderson Dam (Valley Water, California) – Inundation maps», розроблена у 2016 році агенством Valley Water (Рис. 2.1.1., 2.1.2.) показує території, що знаходяться у зоні ризику при руйнуванні дамби Лероя Андерсона вздовж річки Койот-Крік. Це яскравий приклад ситуаційної карти повені. На ній показано території імовірного затоплення за двох сценаріїв, залежно від погодних умов, що є можливим завдяки використанні різнокольорового штрихування для позначення площин. Додатково лінійними знаками показано вулиці в межах населених пунктів, які можуть бути затоплені і недоступні для пересування. Окремо позначені школи, лікарні та пожежні частини, що є корисним для прокладання маршрутів евакуації та інших безпекових заходів для місцевого населення.

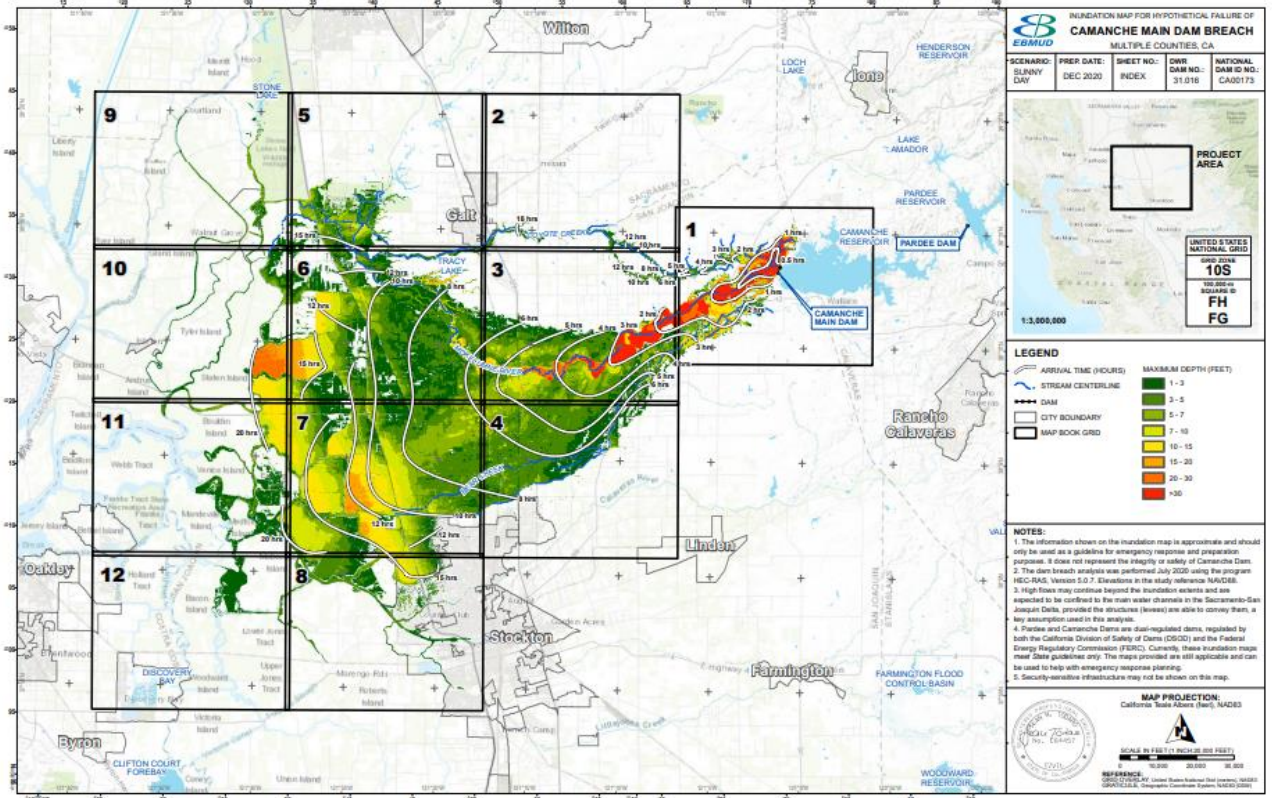


Рис. 2.1.3. Загальна оглядова карта інундації внаслідок руйнування дамби Команчі «Camanche main dam breach» [21]

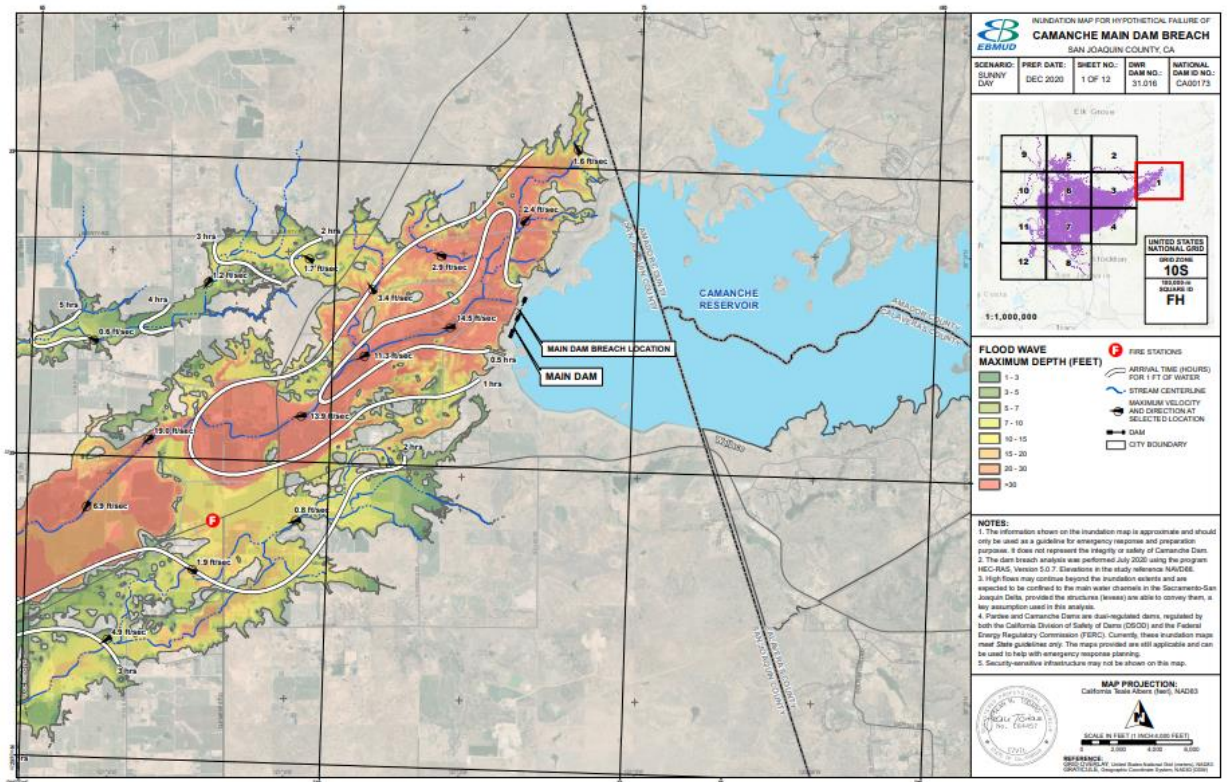


Рис. 2.1.4. Карта «Camanche main dam breach Sheet 1». California DSOD [21]

Часто карти поєднують у собі кілька видів інформації та способів зображення, які роблять їх приналежними одразу до кількох видів картографічних продуктів, згаданих на початку розділу. Так, серія карт «Samanche main dam breach», розроблена Департаментом водних ресурсів Каліфорнії (Рис. 2.1.3., 2.1.4.), показує і максимальну висоту повені (метод кількісного фону), і час прибуття повені (метод ізоліній), і надає дуже детальне уявлення про реальні загрози у випадку катастрофи, і час, що є необхідним на реагування місцевих служб з цивільної безпеки. Ця серія карт є однією із багатьох, розміщених на веб-ресурсі Департаменту водних ресурсів Каліфорнії, що є гарним прикладом можливостей взаємодії місцевих органів влади із населенням, оскільки цей ресурс є доступним абсолютно для усіх. Водночас, картографічні матеріали можна завантажити у форматі, придатному для відображення та редагування у ГІС, що робить даний ресурс гарним джерелом інформації і для наукової діяльності.

Із досвіду картографування європейськими дослідниками, значний картографічний доробок присутній у роботах А. Маранцоні, К. Ріццо та М. Д'Орія, присвячених моделюванню зон ризику в межах Італії, на прикладі дамби водосховища Міньяно, розташованого на річці Арда у Аппенінах. У дослідженні «Probabilistic mapping and sensitivity assessment of dam-break flood hazard» математичні розрахунки доповнені гарними прикладами ймовірнісних карт що відображають ймовірність повені внаслідок руйнування дамби (Рис. 2.1.5., а, «Probabilistic inundation extent map»), а також райони поширення повені, відповідно до різних сценаріїв (Рис. 2.1.5., б, «Flooded areas for the reference scenario (S1,0)»).

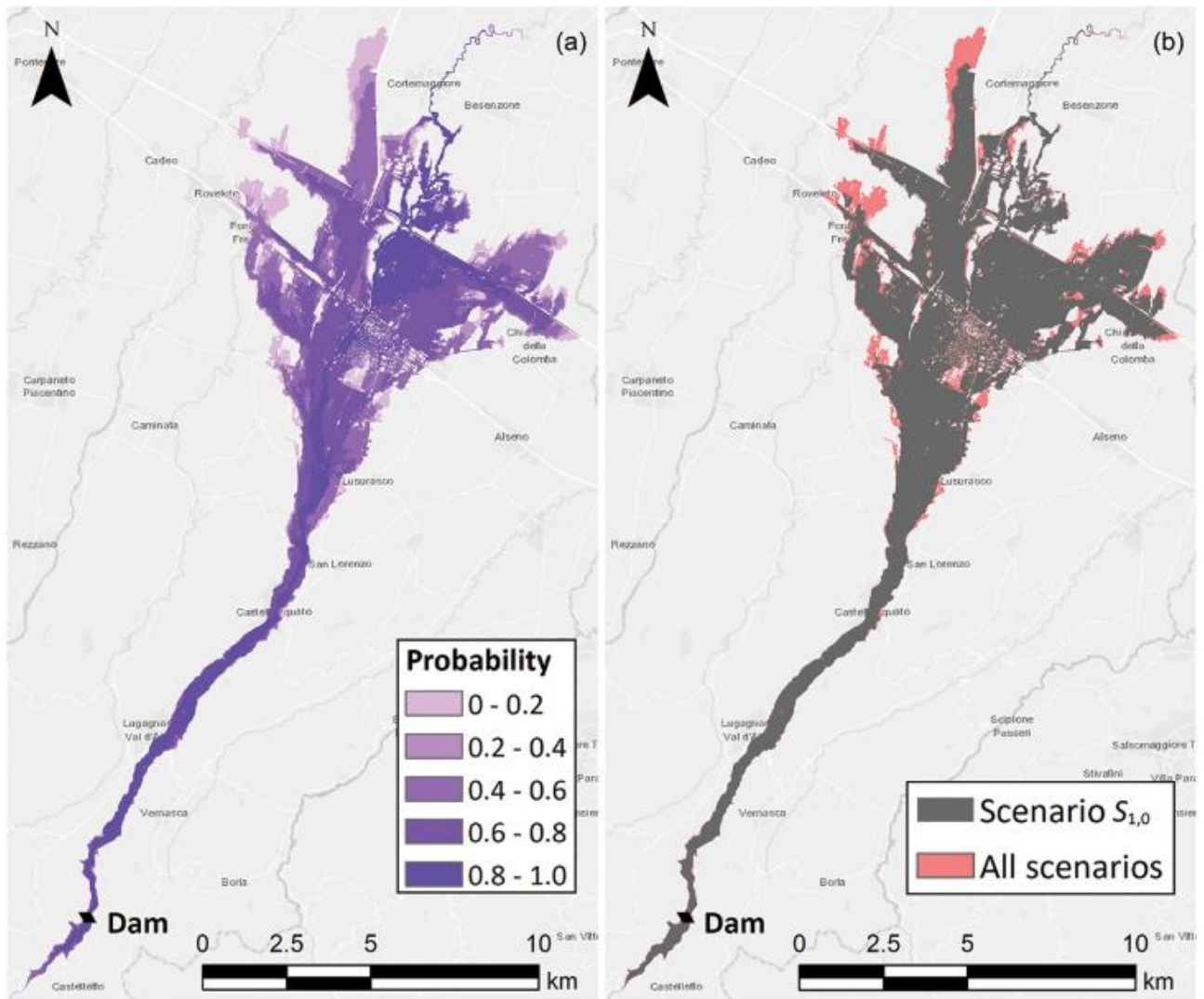


Рис. 2.1.5. Ймовірнісна карта «Probabilistic inundation extent map» (ліворуч) та статична карта повені «Flooded areas for the reference scenario (S1,0)» (праворуч) із дослідження «Probabilistic mapping and sensitivity assessment of dam-break flood hazard». Автори: К. Ріццо, А. Маранцоні, М. Д'Орїа [7]

Сценарії відрізняються між собою відповідно до розмірів зруйнованої частини, поточного рівня води у водосховищі, впливу метеорологічних умов, швидкості реакції екстрених служб з можливістю оперативного ремонту пошкодження, тож дають змогу не тільки визначити зони ризику і наслідки руйнування, але і порівняти їх між собою в залежності від обставин.

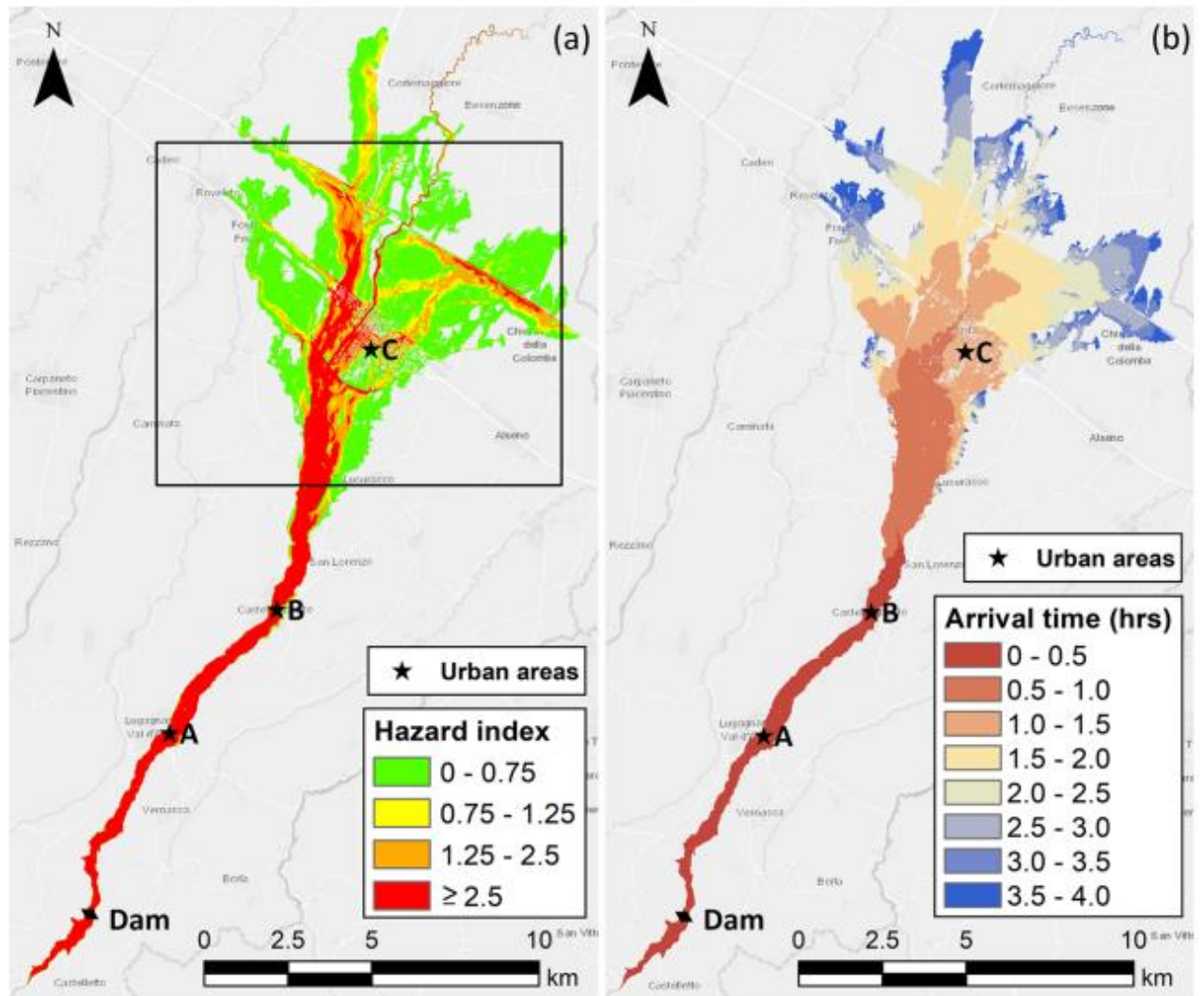


Рис. 2.1.6. Ймовірна карта «Probability-weighted average of flood hazard index HR» (ліворуч) та карта часу прибуття повені «Probability-weighted average of the dam-break wave arrival time» (праворуч) із дослідження «Probabilistic mapping of life loss due to dam-break flooding». Автори: А. Маранцоні, М. Д'Оріа, К. Ріццо [22]

Карти із дослідження цих же авторів «Probabilistic mapping of life loss due to dam-break flooding» (Рис. 2.1.6.) також є гарними прикладами ймовірної карти (а, «Probability-weighted average of flood hazard index HR») та карти часу прибуття повені (b, «Probability-weighted average of the dam-break wave arrival time»). Перша карта відображає індекс загрози, розрахований залежно від імовірності катастрофічних наслідків, які може нести повінь. Так, ми чітко можемо побачити, у яких районах імовірність наслідків є високою, а у яких вона

є меншою. При цьому ми бачимо загальну територію, на яку поширюється повінь, а на другій карті бачимо аналогічну територію, тільки тепер способом кількісного фону там показано час прибуття повені.

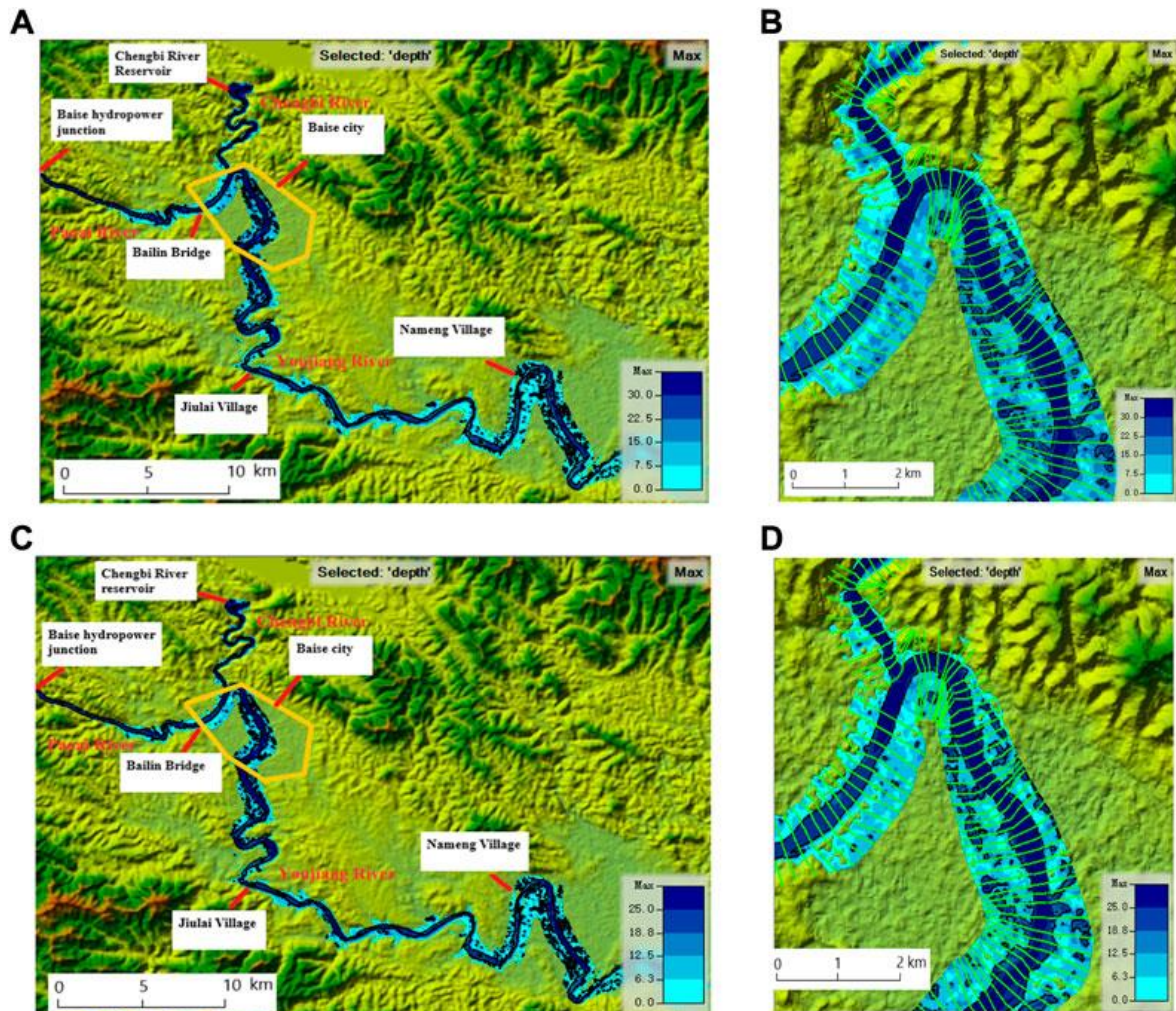


Рис. 2.1.7. Карта висоти повені на річці Ченгбі (Китай) за різними сценаріями «Dam-break flood submerging range of Scheme 2» та «Dam-break flood submerging range of Scheme 3», автори: Ч. Мо, У. Шен, К. Лей, Х. Бан, Ю. Руан, Ш. Лаі, В. Цен та Ж. Хінг [8]

У раніше згаданому дослідженні «Simulation of one-dimensional dam-break flood routing with HEC-RAS — case study» [8] є ще один гарний приклад карт висоти повені, змодельованої у середовищі HEC-RAS. Фрагменти, наведені на Рис. 2.1.7. відображають два основні змодельовані сценарії (залежно від масштабів руйнування), де карти А і В показують висоту повені при повному руйнуванні дамби, а С і D – при частковому руйнуванні (50% структури). Карти

В і D показують наближення до району міста Байсе, яке знаходиться під найбільшим ризиком у випадку імовірної катастрофи.

Якщо казати про сучасні світові тенденції, то все більшого поширення набирає ймовірнісне картографування повеней (із врахуванням невизначеності параметрів прориву на основі цифрових моделей рельєфу). При цьому даний підхід тільки продовжує свій розвиток, і має широке поле для вдосконалення методик та підходів. Також відбувається інтеграція супутникового спостереження та оперативних продуктів дистанційного зондування (Copernicus EMS, Sentinel/Maxar/ICEYE, UNOSAT) для швидкого реагування на події та динамічного оновлення карт. Основна увага при укладанні картографічних продуктів приділяється доступності їх сприйняття для пересічних громадян, та акцентуванні уваги на їх прикладному значенні, враховуючи потреби, що можуть виникнути при необхідності швидкого реагування на потенційну загрозу. Загалом, у більшості розвинутих країн світу карти зон ризику є загальнодоступними, зокрема у режимі онлайн, і відбувається їх постійна актуалізація на рівні муніципалітетів, оскільки у цьому зацікавлені в першу чергу самі органи місцевої влади. Такий підхід дозволяє більш ефективно планувати розміщення підприємств, житлових зон, проводити превентивні заходи та швидко реагувати у випадку реальної загрози.

## 2.2. Моделювання зон ризику в Україні

В контексті України, найбільшим полем для досліджень та моделювання зон ризику став інцидент, пов'язаний із руйнуванням дамби Каховської ГЕС. За цією темою є велике різноманіття картографічних творів, укладених за ініціативи та підтримки Програми ООН по захисту довкілля (UNEP) та Інституту вивчення війни (ISW), виконаних як вітчизняними, так і зарубіжними спеціалістами. Ці продукти містять картографічні оцінки масштабів затоплення та підтоплення, карти зон безпосереднього ураження і прогнозованих

екологічних ризиків. Це є дуже яскравим прикладом української практики оперативного картографування прориву дамби. Вагоме значення має також серія ситуаційних карт від Copernicus EMS activations, JRC Situation Maps, ECHO maps, що включають оцінки висоти повені на різних ділянках та її тривалості, аналіз масштабів руйнування та моделювання самої повені. Ці матеріали часто комбінують супутникові спостереження і 1D/2D моделювання.

Типовими українськими картографічними продуктами, що моделюють зони ризику, є:

1. Оперативні карти масштабів катастрофи (виконані ISW, ICEYE, UNOSAT, Copernicus EMS при тісній співпраці з вітчизняними спеціалістами) як основне джерело даних використовують супутникові дані, швидкі розрахунки та польові дослідження. Такі карти можуть бути швидко створені у випадку реальної загрози на основі супутникових даних, проте їх точність дуже сильно залежить від якості вхідних даних.

2. Модельні оцінки висоти та тривалості повені (ситуативні карти JRC та Copernicus, які використовують цифрові моделі рельєфу та супутникові дані для моделювання, в тому числі і у середовищі HEC-RAS).

3. Інтерактивні карти від Інституту вивчення війни (ISW) та веб-ресурсів ArcGIS Online, з можливістю порівняти ситуацію «до» та «після» руйнування.

Яскравим прикладом оперативної карти масштабів катастрофи є карта від Центру супутникового моніторингу ООН (UNOSAT) «Cumulative Satellite Detected Waters and Impact over Khersonska Oblast in Ukraine between 06 and 09 June 2023», що була створена здебільшого завдяки аналізу космічних знімків та швидкому моделюванню разом із консультаціями з місцевими спеціалістами (в тому числі з українськими науковцями та дослідниками). В центрі уваги – території, що знаходяться в зоні ризику затоплення (червоний колір, якісний фон) та орієнтовна кількість людей, що опинилися в небезпеці (картодіаграми).

Завдяки цій моделі також розраховано приблизну площу, на яку поширюється повінь, і потенційна кількість людей, що знаходяться під впливом катастрофи.

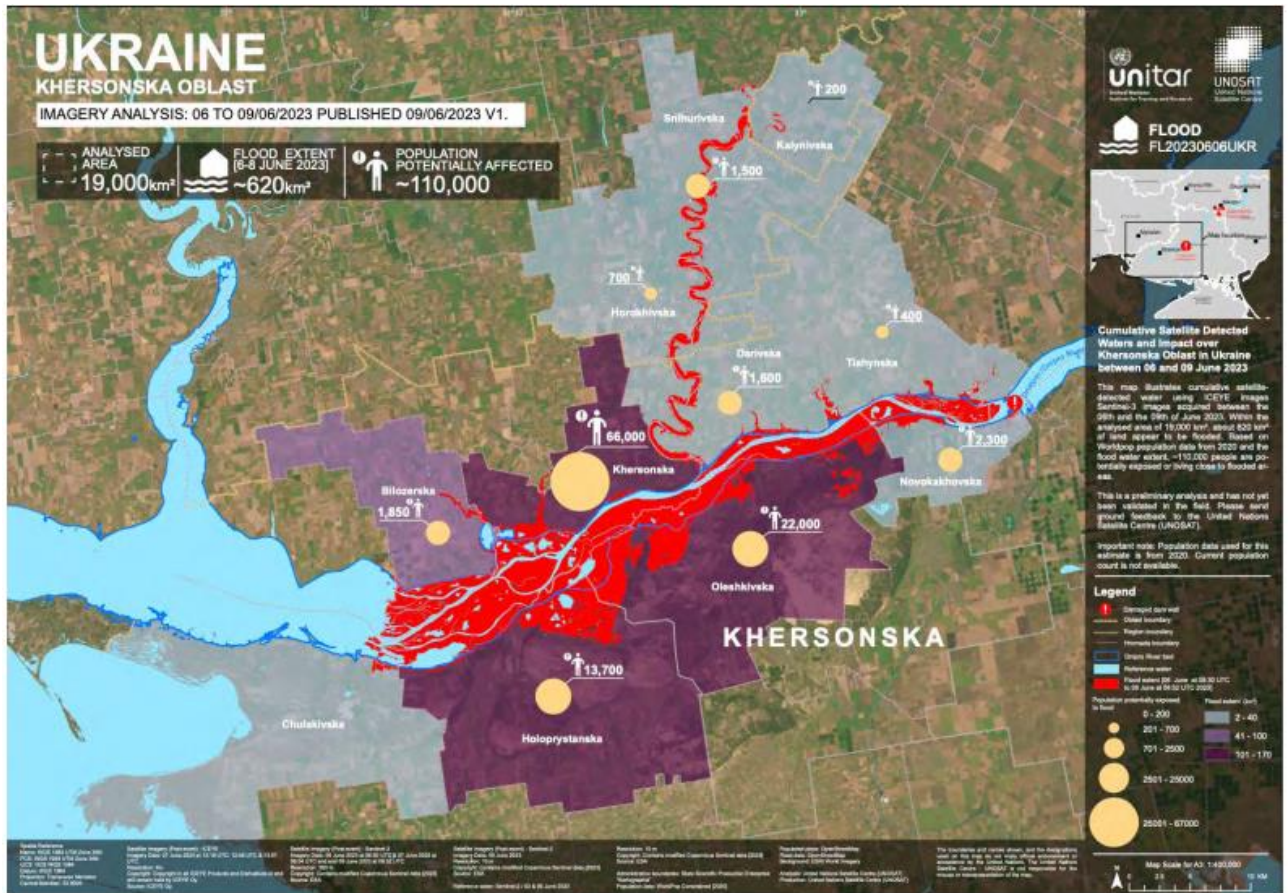


Рис. 2.2.1. Оперативна карта UNOSAT «Cumulative Satellite Detected Waters and Impact over Khersonska Oblast in Ukraine between 06 and 09 June 2023» [23]

Інші карти, що входять до звіту ООН з приводу катастрофи на Каховській ГЕС, зображені на Рис. 2.2.2., 2.2.3. та 2.2.4. Це вже карти із більш специфічною інформацією, отриманою завдяки моделюванню у середовищі MIKE-Flood. Зокрема тут відображено максимальну глибину на затоплених територіях (Рис. 2.2.2. «Maximum water depth», період спостереження – з 06.06.23 по 12.06.23), максимальну швидкість водного потоку (Рис. 2.2.3. «Maximum water velocity»), та показник, що доволі рідко зустрічається у дослідженнях – це навантаження на дно від потоку води (Рис. 2.2.4. «Maximum bed shearstress»). Призначення цих карт вже більш важливе для наукової діяльності та подальших досліджень, в тому числі і для оцінки наслідків катастрофи та її впливу на території.

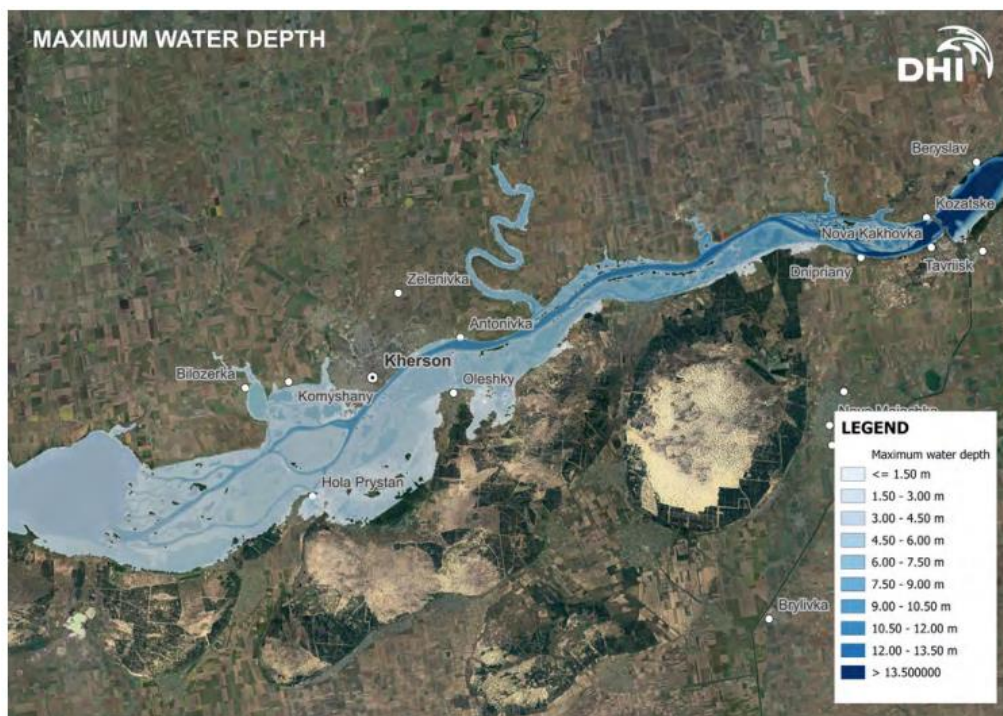


Рис. 2.2.2. Карта «Maximum water depth», що показує максимальну висоту повені / глибини води (м) у районі затоплення. Звіт ООН з приводу катастрофи на Каховській ГЕС [23]

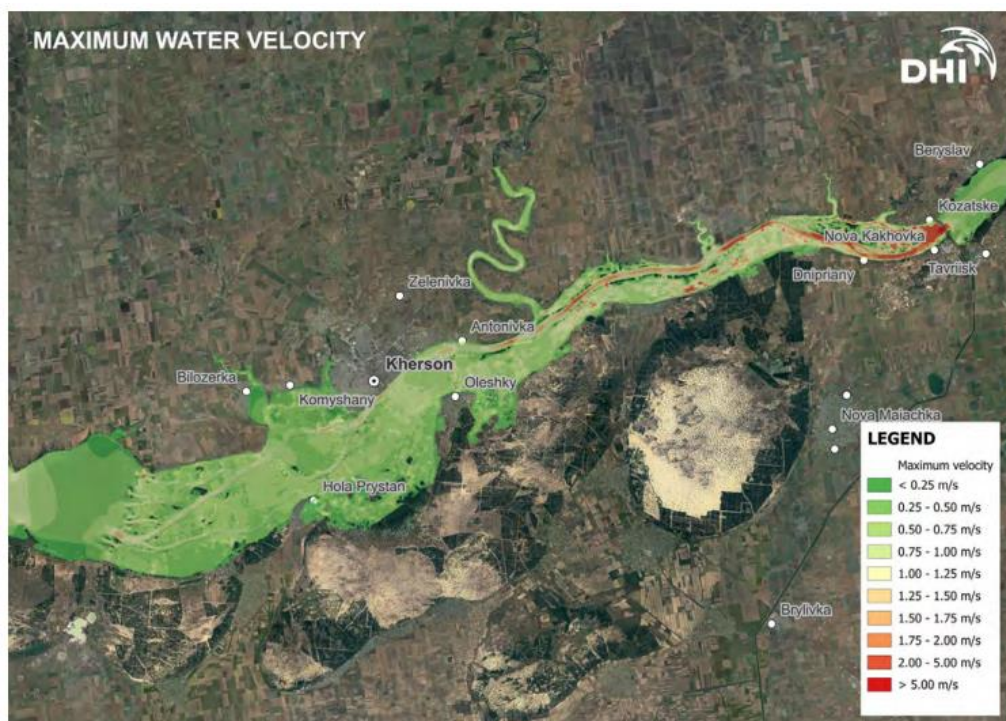


Рис. 2.2.3. Карта «Maximum water velocity», що показує максимальну швидкість потоку води (м/с). Звіт ООН з приводу катастрофи на Каховській ГЕС [23]

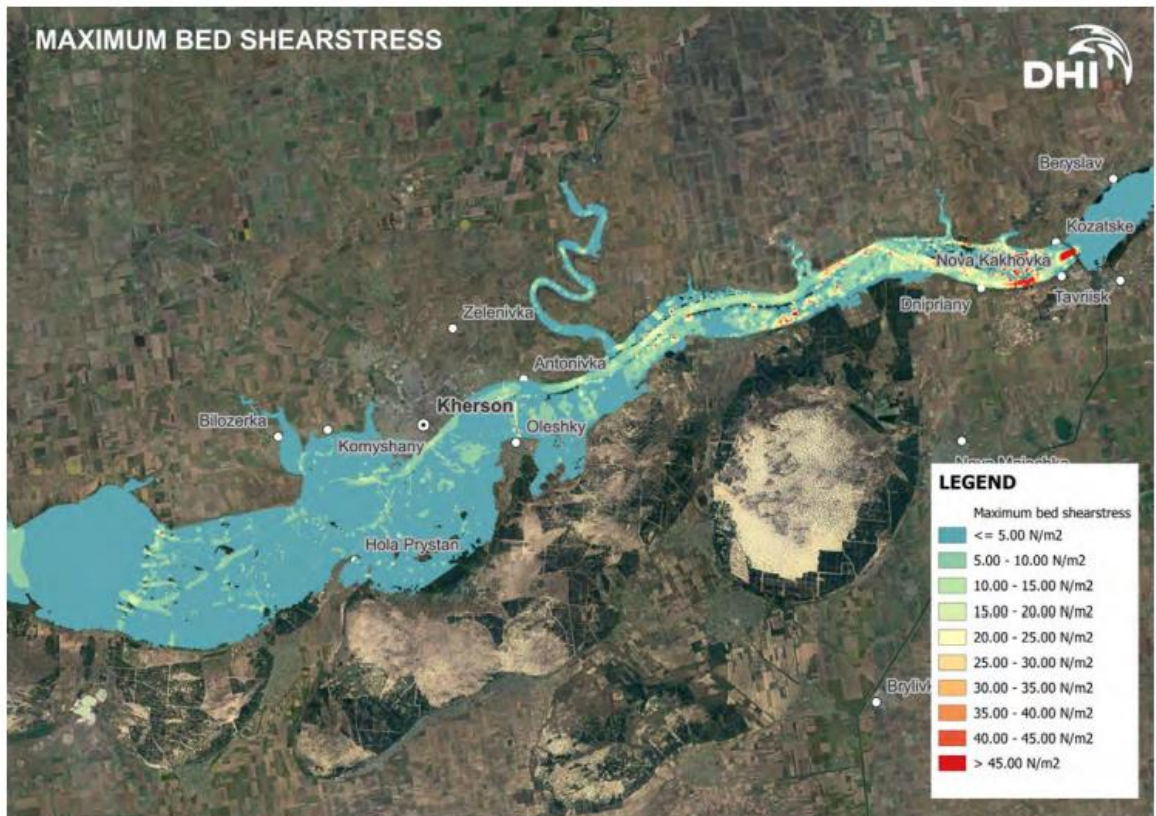


Рис. 2.2.4. Карта «Maximum bed shearstress», що показує максимальне навантаження водного потоку на дно ( $\text{N/m}^2$ ). Звіт ООН з приводу катастрофи на Каховській ГЕС [23]

Прикладом ситуативної карти, де зображено саме модельні оцінки глибини води та тривалості повені, є карта, розроблена Об'єднаним дослідницьким центром Європейської комісії (JRC), зображена на Рис. 2.2.5. Усі дані, показані кількісним фоном, є результатами розрахунків, проведених на основі комп'ютерного моделювання. Окрім цього, розрахований потенційний вплив, паралельно із використанням даних польових досліджень. Також на карті позначено місця розташування підприємств, затоплення яких може мати негативні наслідки для навколишнього середовища (хімічні, нафтопереробні підприємства, електростанції).

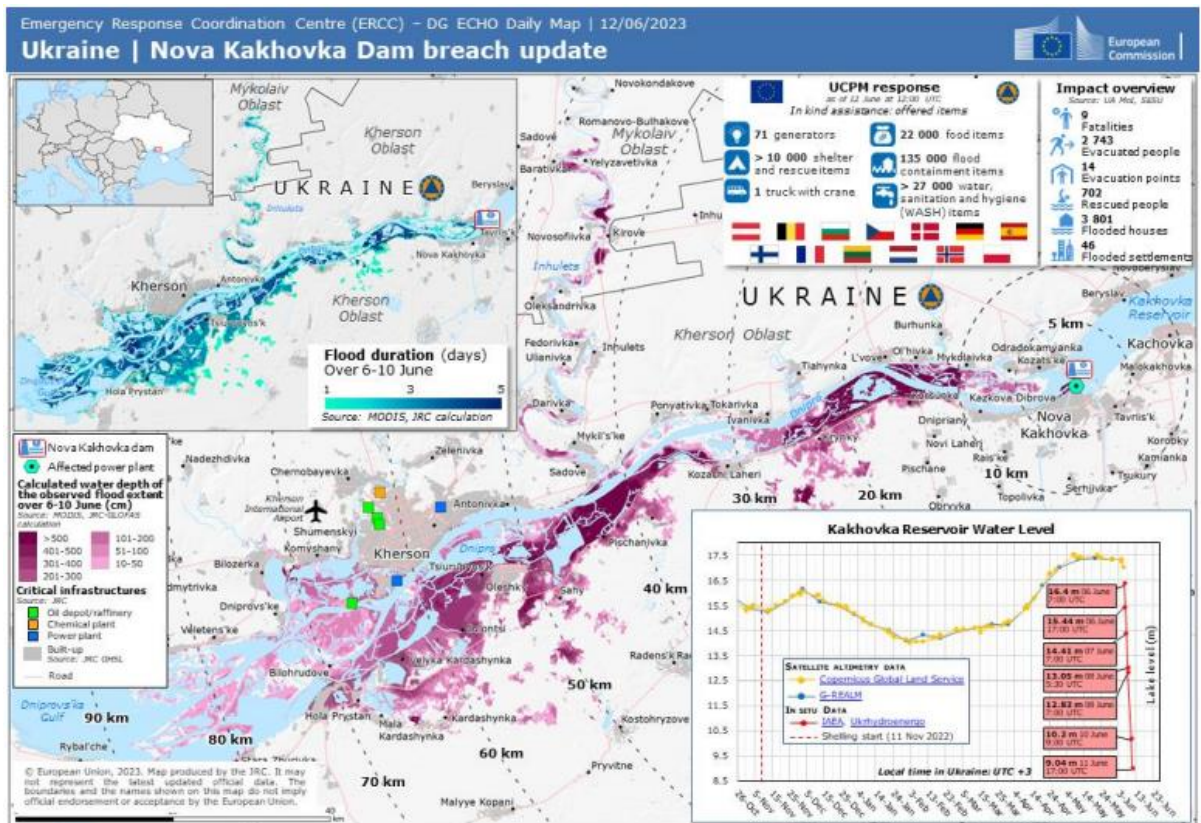


Рис. 2.2.5. Ситуативна карта «Nova Kakhovka Dam breach update» зі звіту Європейської програми цивільного захисту та гуманітарної допомоги (розроблена JRC) [24]

Ще однією картою Об'єднаного дослідницького центру є оперативна карта наслідків руйнування дамби (Рис. 2.2.6.), що демонструє території затоплення, змодельовані за двома сценаріями (фіолетовий – повне руйнування дамби, червоний – часткове руйнування дамби). Як і на попередній карті, показані об'єкти критичної інфраструктури, а жовтими точками позначені населені пункти, де було безпосередньо зафіксовано повінь.

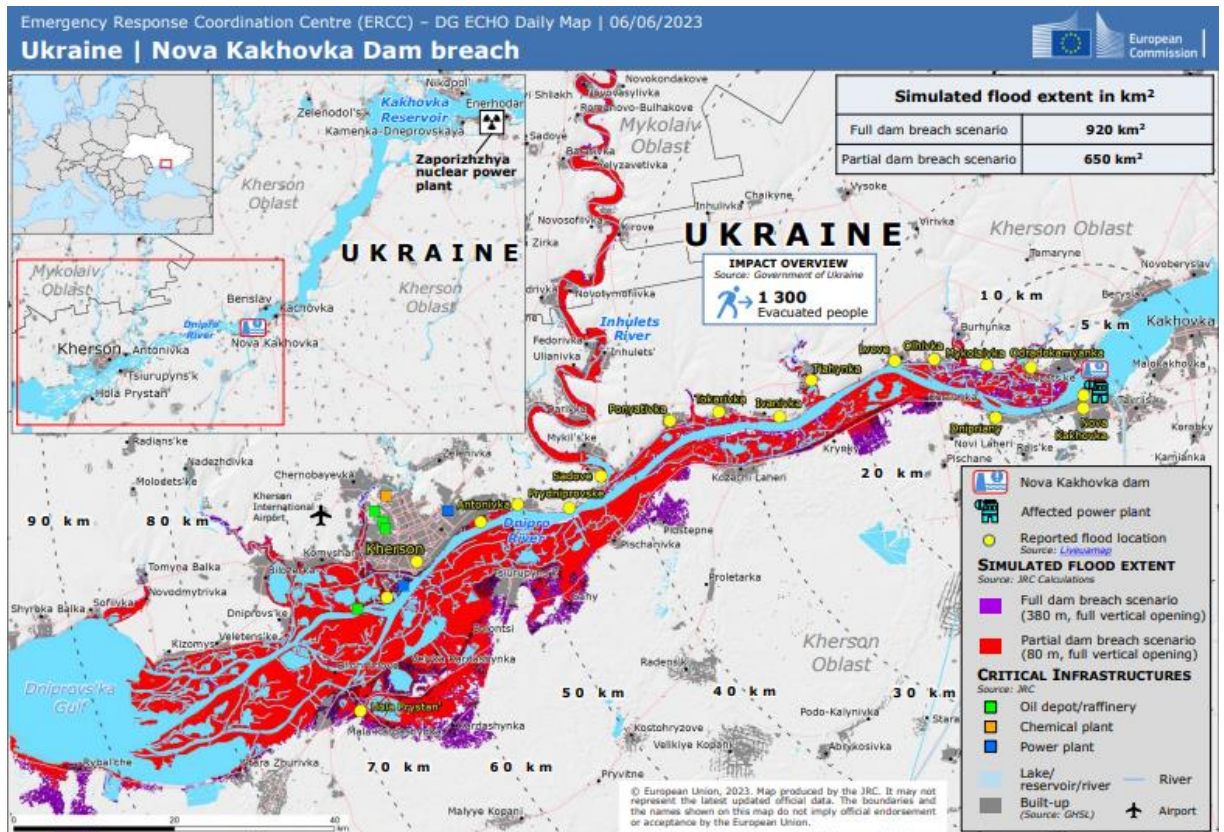


Рис. 2.2.6. Оперативна карта «Nova Kakhovka Dam breach» Європейської програми цивільного захисту та гуманітарної допомоги (DG ECHO Daily Map) [24]

Щодо інтерактивних карт, найкращим прикладом є карта, розроблена Інститутом вивчення війни на основі платформи ArcGIS Online (Рис. 2.2.7, 2.2.8). Вона показує межі максимального поширення повені, і завдяки інструменту «шторка» (swipe tool) дає змогу детально порівняти ситуацію «до» та «після» руйнування дамби. Завдяки цьому можна швидко і якісно провести порівняльний аналіз, визначивши масштаби катастрофи та безпосередні території, що опинилися в зоні ризику. У якості додаткової інформації на карті позначені території, що контролюються російськими окупаційними військами та їх фортифікаційні споруди. Таким чином, можна також простежити вплив катастрофи на перебіг військових дій та оцінити потенційний ефект у майбутньому.

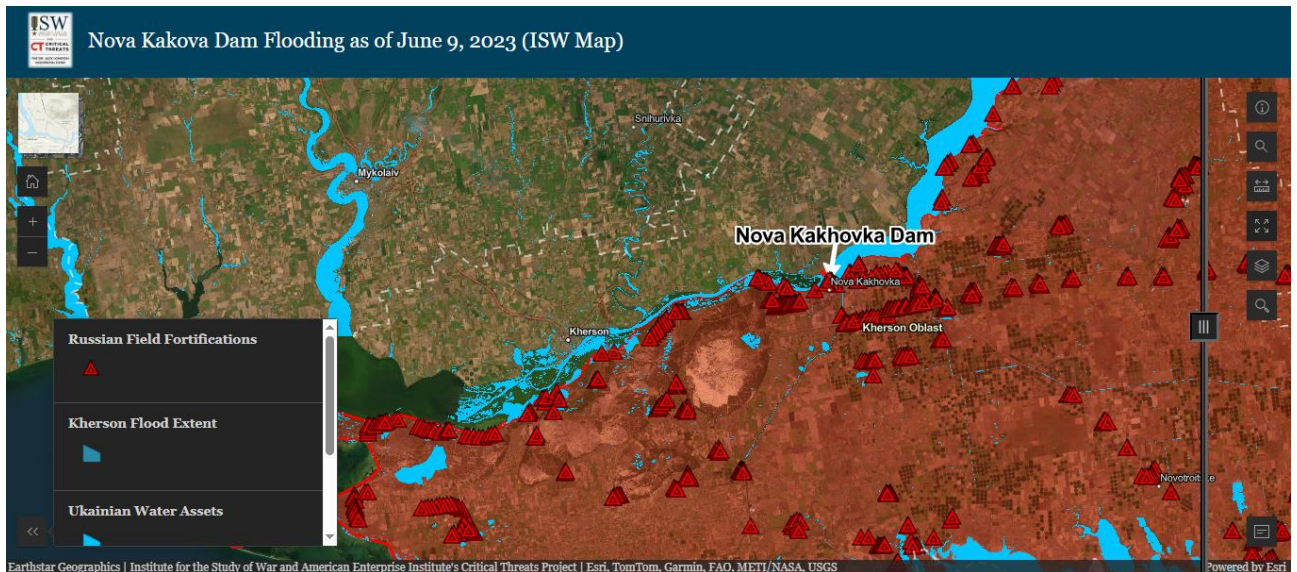


Рис. 2.2.7. Інтерактивна карта ISW. «Nova Kakhovka Dam Flooding as of June 9, 2023». Зображення «до» руйнування дамби. [25]

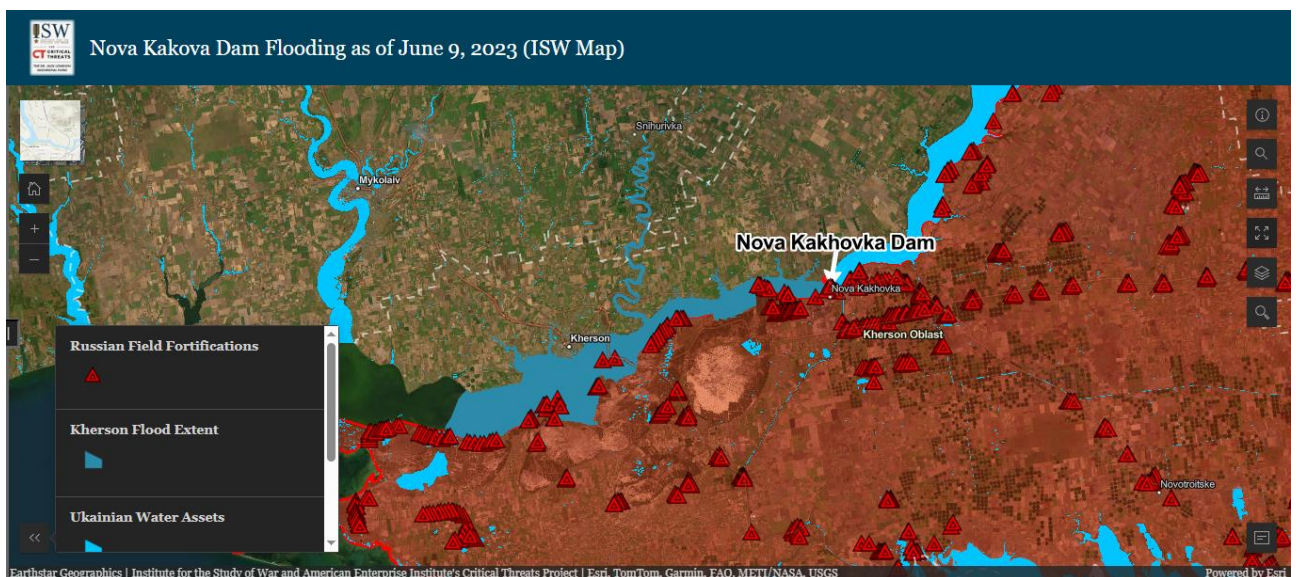


Рис. 2.2.8. Інтерактивна карта ISW «Nova Kakhovka Dam Flooding as of June 9, 2023», зображення «після» руйнування дамби (станом на 9 червня 2023 року) [25]

Користувачі при перегляді цих карт можуть вмикати та вимикати потрібні шари, що збільшує можливості для аналізу. Окрім цього, відносна простота у використанні дає змогу більшій кількості людей отримати важливу інформацію, не залежно від рівня освіти та навичок роботи зі спеціальним програмним забезпеченням.

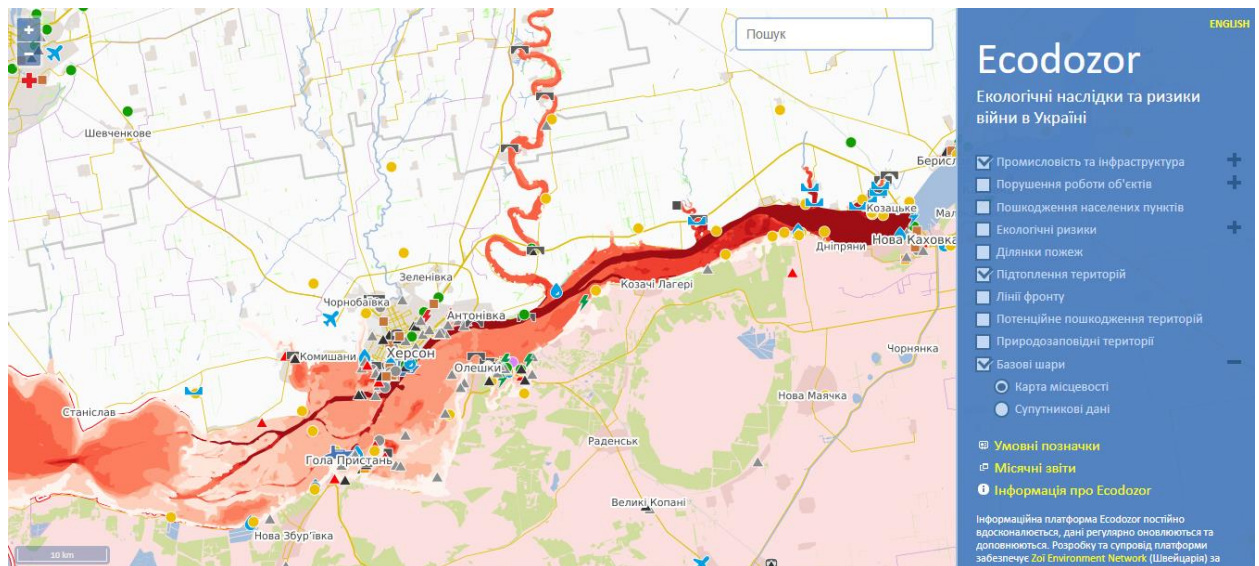


Рис. 2.2.9. Інтерактивна карта «Екологічні наслідки та ризики війни в Україні» на платформі Ecodozor, що показує території затоплення та підтоплення внаслідок руйнування дамби Каховської ГЕС [40]

Ще одним прикладом інтерактивної карти зон ризику є платформа Ecodozor (Рис. 2.2.9.). Окрім інформації про затоплення та розташування критичної інфраструктури, карта дає інформацію і про інші екологічні проблеми, що виникають внаслідок війни в Україні. Кількісний фон на карті показує висоту повені, і, водночас, можна прослідкувати і території затоплення. Але при цьому платформа використовує дані звітів ООН та ОБСЄ, відповідно, цей сервіс просто дозволяє переглядати дані моделювання із накладанням різних шарів інформації.

Щодо інших катастроф часів повномасштабного вторгнення (наприклад руйнування дамб Оскільського, Карачунівського водосховищ), та подій, пов'язаних із затопленням територій, що відбувалися раніше (наприклад, руйнування ДніпроГЕС 1941 року), у відкритих джерелах дані представлені в основному лише у вигляді письмових даних або у крайньому випадку, як супутникові чи аерофотознімки. Єдиний картографічний матеріал, який вдалося знайти, це карта районів затоплення під час руйнування дамби у Бабиному Яру в Києві, 1961 року (Рис. 2.2.9.). Дана карта заснована виключно на історичних документах, і при її укладанні не проводилося комп'ютерного чи математичного

моделювання, відповідно через це важко оцінити точність показаних зон затоплення.



Рис. 2.2.9. Карта зони затоплення внаслідок руйнування дамби в гирлі Бабиного Яру, «Куренівська трагедія 13 березня 1961 року». Розробник карти – інформаційне агенство «Бабель» [26]

Загалом, потенціал для проведення картографічного моделювання зон ризику в Україні залишається дуже високим, і у цьому питанні дуже важливо вивчати та спиратися на міжнародний досвід. Карти зон ризику мають бути доступні не лише як частина науково-дослідницьких робіт, але і як відкриті веб-сервіси, якими може вільно користуватися будь-яка людина, чи то співробітники рятувальних служб, державні посадовці, науковці, чи звичайні громадяни. Наразі ж переважна більшість карт, що доступні у відкритих джерелах, укладена з

ініціативи та підтримки міжнародних організацій, охоплює переважно випадок з Каховською ГЕС, і не поширюється на інші інциденти, що відбулися як під час повномасштабного вторгнення, так і до нього. Внесок вітчизняних науковців та дослідників у ці роботи є недостатньо великим. Не виключено, що через військовий стан подібні карти, розроблені українськими авторами є відсутніми у публічному просторі, і можуть з'явитися протягом наступних років, особливо за умови завершення військових дій, оскільки це дасть змогу провести не лише комп'ютерне та математичне моделювання, але і відкриє можливості для безпечних польових досліджень. Важливим є моделювання не лише наслідків руйнування великих водосховищ, але також середніх і малих, оскільки цілком можливо, що загальноприйняті методи, формули та алгоритми можуть показувати меншу ефективність та потребуватимуть уточнень чи коригування.

### РОЗДІЛ 3.

## МОДЕЛЮВАННЯ ІМОВІРНИХ ЗОН РИЗИКУ ВНАСЛІДОК РУЙНУВАННЯ ДАМБИ ТРАВ'ЯНСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА

### 3.1. Характеристика Трав'янського водосховища

Трав'янське водосховище було збудовано на р. Харків у період з 1969 по 1972 рр. Його основні морфометричні характеристики представлені у табл. 3.1.1.

Таблиця 3.1.1.

Основні морфометричні властивості Трав'янського водосховища.

| Довжина, км                          | Ширина,<br>макс./пор, км             | Глибина,<br>макс./пор, м        | Площа<br>дзеркала,<br>км <sup>2</sup>     | Обсяг, млн.<br>м <sup>3</sup>                   |
|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|---|---|
| 8,2                                  | 1,38 /0,8                            | 9,0/3,8                         | 5,92                                      | 22,0  |
| Нормальний<br>підпірний<br>рівень, м | Форсований<br>підпірний<br>рівень, м | Рівень<br>мертвого<br>об'єму, м | Корисний<br>об'єм, млн.<br>м <sup>3</sup> | Площа<br>мілководдя<br>(до 2м), км <sup>2</sup> |
| 128,0                                | 129,0                                | 122,6                           | 10,6                                      | 1,30  |

З моменту створення водосховище використовується для зрошення, риборозведення та рекреації населення. Вже 1980г. його відвідувало близько 200 тисяч осіб на рік. Основні гідрологічні характеристики водосховища: [43]

- Площа водозбірного басейну – 240 км<sup>2</sup>.
- Річний об'єм стоку 50 % забезпеченості – 16,8 млн м<sup>3</sup>.
- Паводковий стік 50 % забезпеченості – 14,1 млн м<sup>3</sup>.
- Максимальні витрати води 1 % забезпеченості – 160 м<sup>3</sup>/с.

До складу гідротехнічних споруд входять: [48]

- Глуха земляна гребля довжиною 940 метрів, висотою 13 метрів та шириною 10 метрів.

- Шахтний водоскид із монолітного залізобетону, трьохвічковий, висотою 8 м, розмірами 3 (3,0x2,5) м, обладнаний плоскими донними затворами, що мають розміри 3x2 м.
- Водоскидний тунель трьохвічковий розмірами 2(3,0x2,5) м у бокових секціях, і 3,8x2,5 м – у середній.

Окремим елементом характеристики є екологічний стан водосховища, який проявляється у складі місцевої біоти та хімічних параметрах води. Поширення найпростіших живих організмів (видовий склад фітопланктону, його кількість та біомаса), наведені у Табл. 3.1.2. [49]

Таблиця 3.1.2.

Видовий склад, кількість та біомаса фітопланктону Трав'янського водосховища

| № п/п | Таксони  | К-сть, млн. кл/л | Біомаса, мг/л |
|-------|--|------------------|---------------|
| 1     | 2  | 3                | 4             |
| 1     | <i>Aphanizomenon flos-aquae</i> (L.) Ralfs     | 10,51            | 1,29          |
| 2     | <i>M. tenuissima</i> Lemm.                     | 37,5             | 0,083         |
| 3     | <i>Microcystis aeruginosa</i> Kütz. em. Elenk. | 2,5              | 0,174         |
| 4     | <i>M. pulverea</i> (Wood) Forti em. Elenk.     | 12,5             | 0,028         |
| 5     | <i>Oscillatoria agardii</i> Gom.               | 7,81             | 0,86          |
| 6     | <i>O. limnetica</i> Lemm.                      | 1,5              | 0,16          |
|       | <b>Всього Синьо-зелених</b>                    | <b>72,32</b>     | <b>2,6</b>    |
| 7     | <i>Chrysococcus biporus</i> Skuja              | 0,15             | 0,04          |
| 8     | <i>C. rufescens</i> Klebs                      | 0,156            | 0,048         |
|       | <b>Всього Золотистих</b>                       | <b>0,306</b>     | <b>0,088</b>  |
| 9     | <i>Goniochloris mutica</i> (A.Br.) Fott        | 0,078            | 0,008         |
|       | <b>Всього Жовто-зелених</b>                    | <b>0,078</b>     | <b>0,008</b>  |
| 10    | <i>Cocconeis pediculus</i> Ehr.                | 0,078            | 0,036         |
| 11    | <i>Cyclotella glomerata</i> Bachmann           | 0,625            | 0,1           |
| 12    | <i>C. meneghiniana</i> Kütz.                   | 0,078            | 0,262         |
| 13    | <i>N. palea</i> var. <i>tenuirostris</i> Grun. | 0,07             | 0,01          |
| 14    | <i>Stephanodiscus hantzschii</i> Grun.         | 0,076            | 0,02          |

Продовження табл. 3.1.2.

| 1  | 2  | 3            | 4            |
|----|--|--------------|--------------|
| 15 | <i>S. tenera</i> W. Sm.  | 0,104        | 0,007        |
|    | <b>Всього Діатомових</b>                                       | <b>1,03</b>  | <b>0,435</b> |
| 16 | <i>Euglena</i> sp.   | 0,08         | 0,112        |
| 17 | <i>Trachelomonas oblonga</i> Lemm.                             | 0,078        | 0,021        |
|    | <b>Всього Евгленових</b>                                       | <b>0,158</b> | <b>0,133</b> |
| 18 | <i>Ankyra ocellata</i> (Korsch.) Fott                          | 0,468        | 0,077        |
| 19 | <i>C. klebsii</i> France                                       | 0,16         | 0,07         |
| 20 | <i>Chlamydomonas</i> sp.                                       | 0,156        | 0,115        |
| 21 | <i>Chlorococcum infusionum</i> (Schrank) Menegh.               | 0,31         | 0,17         |
| 22 | <i>Closteriopsis acicularis</i> (G. M. Smith) Belcher et Swale | 0,63         | 0,035        |
| 23 | <i>Coelastrum microporum</i> Näg.                              | 1,25         | 0,198        |
| 24 | <i>C. sphaericum</i> Näg.                                      | 1,23         | 0,325        |
| 25 | <i>Crucigenia quadrata</i> Morren                              | 2,5          | 0,15         |
| 26 | <i>Didymocystis planctonica</i> Korsch.                        | 0,625        | 0,144        |
| 27 | <i>M. tortile</i> (W. et G.S. West) Kom.-Legn.                 | 0,156        | 0,032        |
| 28 | <i>Oocystis borgei</i> Snow                                    | 2,34         | 1,05         |
| 29 | <i>O. lacustris</i> Chod.                                      | 2,19         | 0,81         |
| 30 | <i>Phacotus coccifer</i> Korsch.                               | 1,25         | 0,546        |
| 31 | <i>Scenedesmus acuminatus</i> (Lagerh.) Chod.                  | 0,078        | 0,015        |
| 32 | <i>S. bicaudatus</i> Deduss.                                   | 0,625        | 0,13         |
| 33 | <i>S. quadricauda</i> (Turp.) Breb.                            | 0,156        | 0,02         |
| 34 | <i>Sphaerocystis planctonica</i> (Korsch.) Bourr.              | 0,312        | 0,14         |
|    | <b>Всього Зелених</b>  | <b>14,44</b> | <b>4,03</b>  |
|    | <b>ЗАГАЛОМ</b>   | <b>88,33</b> | <b>7,29</b>  |

У складі найвищої водної рослинності Трав'янського водосховища виділяється 14 видів. Дослідження 2016 року [49] показало, що серед повітряно-водної рослинності переважають очерет звичайний (*Phragmites australis*) з окремими куртинами рогозу вузьколистого (*Typha angustifolia*) і рогозу широколистого (*Typha latifolia*). Крім того, зі складу цієї рослинності

окремими куртинами зустрічається очерет озерний (*Scirpus lacustris*), частуха подорожникова (*Alisma plantago - aquatica*) та сусак парасольковий (*Butomus umbellatus*). Слід враховувати, що повітряно-водна рослинність відіграє велику роль у зміцненні берегів водойми. Крім того, вона є субстратом для формування на ній колоній іммобілізованих мікроорганізмів, що беруть участь у самоочищенні води водоймища – тобто виступає в ролі природного біоплато.

Окрім повітряно-водної рослинності у водоймі розвивається занурена вища водна рослинність. З її складу тут були виявлені кушир занурений (*Ceratophyllum demersum*), рдесник гребінчастий (*Potamogeton pectinatus*) і пронизанолистий (*P. perfoliatus*), водопериця кільчаста (*Meriophyllum verticillatum*).

Загальна площа мілководдя (до 2 метрів) становила 1,30 км<sup>2</sup>. Зараз, за прозорості води 1,8м, занурена рослинність просунулась до глибини 3,2 м. Тому, нині площа, де розвиваються занурені водні рослини збільшилася щонайменше у 1,5 рази – до 1,95 км<sup>2</sup>.

Крім великої кількості зануреної рослинності, практично на всіх ділянках вона була покрита нитчастими водоростями, які при сильному розвитку можуть значно погіршити екологічний стан водойм.

Аналіз популяцій зоопланктону за період 1991-2016 років показав, що його склад змінився слабо. Узагальнена інформація щодо зафіксованих представників таксонів представлена у Табл. 3.1.3. [49]

Табл. 3.1.3.

Видове різноманіття зоопланктону Трав'янського водосховища

| № п/п            | Таксон                      | 1991 рік | 1998 рік | 2016 рік |
|------------------|-----------------------------|----------|----------|----------|
| 1                | 2                           | 3        | 4        | 5        |
| <b>Rotatoria</b> |                             |          |          |          |
| 1                | <i>Asplanchna priodonta</i> | +        | +        | +        |
| 2                | <i>Filinia longiseta</i>    | +        | +        | +        |
| 3                | <i>Keratella quadrata</i>   | +        | +        | +        |
| 4                | <i>K. cochlearis</i>        | +        | +        | +        |

Продовження табл. 3.1.3.

| 1                      | 2  | 3  | 4  | 5  |
|------------------------|--|----|----|----|
| 5                      | <i>Poliarthra major</i>                    | +  | +  | +  |
| 1                      | 2  | 3  | 4  | 5  |
| 6                      | <i>Pompholyx complanata</i>                | +  | +  | +  |
| 7                      | <i>Trichocerca pusilla</i>                 | +  | +  | +  |
| 8                      | <i>T. stylata</i>                          | +  | -  | +  |
| <b>Cladocera</b>       |  |    |    |    |
| 9                      | <i>Alona quadrangularis</i>                | +  | -  | +  |
| 10                     | <i>Bosmina longirostris</i>                | -  | -  | +  |
| 11                     | <i>B. coregoni</i>                         | +  | +  | +  |
| 12                     | <i>Daphnia cucullata</i> Sars              | +  | -  | +  |
| 13                     | <i>Chidorus sphaerics</i>                  | -  | +  | +  |
| 14                     | <i>Daphnia longispina</i>                  | -  | +  | -  |
| 15                     | <i>Simocepholus vetulus</i>                | -  | +  | -  |
| <b>Copepoda</b>        |  |    |    |    |
| 16                     | <i>Acanthocyclops americanus</i>           | +  | +  | +  |
| 17                     | <i>Cyclops vicinus</i>                     | +  | +  | +  |
| 18                     | <i>Eudiaptomus gracilis</i>                | +  | -  | +  |
| 19                     | <i>Mesocyclops crassus</i>                 | +  | +  | +  |
| <b>Mollusca</b>        |  |    |    |    |
| 20                     | <i>Dreissena polymorpha</i> Pall., veliger | -  | +  | +  |
| <b>Усього таксонів</b> |  | 15 | 15 | 18 |

За біомасовими показниками кількість зоопланктону у 2016 році дещо збільшилась. Увесь зоопланктон Трав'янського водосховища представлений кормовими організмами для риб.

Аналіз семи проб зообентосу, відібраних у липні 2016 р., показав, що зообентична спільнота Трав'янського водосховища представлена личинками різних комах: бабок, двокрилих (головним чином хірономід) та олігохетами. Основну біомасу становили личинки хірономід, зона проживання, яких приурочена до мулів у центральній частині водойми, а також по його периметру. На ділянках порослих вищою водною рослинністю зустрічалися личинки бабок. Рідко та поодинокі були відзначені водні жуки. З двостулкових моллюсків

виявлені дрейсена річкова та беззубка, що зустрічається в літоральній зоні при середній щільності 1-2 екз/м<sup>2</sup>.

Видовий склад іхтіофауни Трав'янського водосховища складався на основі складу риби річки Харків та під дією факторів, пов'язаних з виникненням водосховища та рибогосподарської діяльності, що наразі проводиться на ньому. На сьогоднішній день склад риби водосховища налічує 19 видів. Масовими видами є: лящ, судак, плотва, окунь, краснопірка, укляу. Також часто зустрічаються товстолобики (білий, строкатий та їхній гібрид), короп, щука, густера, карасі (срібний та золотий) та голка-риба. Рідко зустрічаються йорж, бички (три види) та білий амур. Випадків масової загибелі риби внаслідок погіршення екологічного стану водосховища за період його існування не відзначалося.

Оцінку якості води водосховища було здійснено на основі даних різноманітних організацій, зокрема відомчої інформації Міністерства захисту довкілля (раніше – Міністерство охорони навколишнього природного середовища, Мінприроди), Державного агентства водних ресурсів (Держводагенство), Державного комітету водного господарства (Держводгосп), ретроспективних даних досліджень Українського науково-дослідного інституту екологічних проблем (УКРНДІЕП), [44; 45; 49]. Для оцінки якості води також використовувалися чинні рибогосподарські та екологічні нормативні документи [50; 51].

Узагальнені показники якості води протягом різних періодів спостереження (1998-2022 роки) представлені у таблицях 3.1.3-3.1.8.

Таблиця 3.1.3.

Показники якості води Трав'янського водосховища, дані УКРНДІЕП, 1998 рік

| Показник               | Одиниця виміру                    | Трав'янське водосховище, верхів'я | Трав'янське водосховище, центр | Трав'янське водосховище, 1 км від греблі, правий берег | ГДК для вод рибогосподарського призначення | Кордон 3 та 4 категорій екологічної оцінки |
|------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|--|--|--|
| Сухий залишок          | мг/дм <sup>3</sup>                | 398                               | 400                            | 406  | -  | 1000                                       |
| Хлориди                | мг/дм <sup>3</sup>                | 15,5                              | 14,5                           | 15,8   | 100  | 75   |
| Сульфати               | мг/дм <sup>3</sup>                | 105                               | 105                            | 100  | 500  | 100  |
| Жорсткість             | мг-екв/дм <sup>3</sup>            | 5,38                              | 5,38                           | 5,18   | -  | -  |
| Зважені речовини       | мг/дм <sup>3</sup>                | 20                                | 19,2                           | 12,4   | -  | -  |
| t °                    | оС                                | 22                                | 21,2                           | 21,1   | -  | -  |
| O <sub>2</sub>         | мг/дм <sup>3</sup>                | 9,17                              | 9,89                           | 9,22   | 6  | 7,1  |
| Показник рН            | -                                 | 8,37                              | 8,44                           | 8,38   | 8,5  | 8,1  |
| БСК <sub>5</sub>       | мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup> | 1,52                              | 0,41                           | 0,97   | 3  | 2,1  |
| ХСК                    | мгО/дм <sup>3</sup>               | 8,8                               | 17,6                           | 7,6  | 50   | 25   |
| Азот нітритний         | мгN/дм <sup>3</sup>               | 0,006                             | 0,002                          | 0,004  | 0,02                                       | 0,01                                       |
| Азот нітратний         | мгN/дм <sup>3</sup>               | 0,2                               | 0,1                            | 0,1  | 9,1  | 0,5  |
| Азот амонійний         | мгN/дм <sup>3</sup>               | 0,37                              | 0,09                           | 0,12   | 0,5  | 0,3  |
| Мінеральний азот (сум) | мгN/дм <sup>3</sup>               | 0,576                             | 0,192                          | 0,224  | -  | -  |
| Фосфати                | мг/дм <sup>3</sup>                | 0,34                              | 0,29                           | 0,28   | 2,1  | 0,15                                       |
| Фосфор фосфатів        | мгP/дм <sup>3</sup>               | 0,111                             | 0,095                          | 0,091  | -  | -  |
| Співвідношення N/P     | -                                 | 5,19                              | 2,03                           | 2,45   | -  | -  |

Таблиця 3.1.4.

Якість води за відомчою інформацією Мінприроди за 2009-2013 роки, р.

Харків, вище від Трав'янського водосховища

| Показник                                    | ПДКр | максимум | середня | мінімум |
|---|------|----------|---------|---------|
| Температура, °С                             | -    | 24,50    | 10,11   | 1,00    |
| Зважені речовини, мг/дм <sup>3</sup>        | -    | 11,80    | 4,76    | 2,50    |
| рН  | 8,5  | 8,10     | 7,85    | 7,47    |
| Сума іонів, мг/дм <sup>3</sup>              | -    | 755,0    | 623,8   | 482,0   |
| Кисень, мг/дм <sup>3</sup>                  | 6    | 8,38     | 7,30    | 6,61    |
| Насичення киснем, %                         | -    | 89,0     | 65,3    | 48,9    |
| БСК5, мгО2/дм <sup>3</sup>                  | 3    | 4,64     | 3,23    | 2,23    |
| ХСК, мгО2/дм <sup>3</sup>                   | 50   | 32,90    | 23,80   | 19,00   |
| Хлориди, мг/дм <sup>3</sup>                 | 300  | 57,72    | 30,60   | 18,24   |
| Сульфати, мг/дм <sup>3</sup>                | 100  | 194,49   | 152,69  | 97,90   |
| Магній, мг/дм <sup>3</sup>                  | 40   | 41,34    | 30,68   | 15,90   |
| Кальцій, мг/дм <sup>3</sup>                 | 180  | 118,32   | 95,84   | 44,40   |
| Загальна жорсткість, мг-екв/дм <sup>3</sup> | -    | 8,50     | 7,31    | 3,50    |
| Лужність                                    |      | 8,90     | 7,18    | 6,00    |
| Азот амонійний, мгN/дм <sup>3</sup>         | 0,5  | 0,36     | 0,28    | 0,23    |
| Азот нітритний, мгN/дм <sup>3</sup>         | 0,02 | 0,047    | 0,015   | 0,002   |
| Азот нітратний, мгN/дм <sup>3</sup>         | 9    | 0,87     | 0,52    | 0,27    |
| Азот мінеральний (сум), мгN/дм <sup>3</sup> |      | 1,19     | 0,81    | 0,59    |
| Фосфати, мг/дм <sup>3</sup>                 | 2,1  | 1,20     | 0,90    | 0,57    |
| Фосфор фосфатів, мгP/дм <sup>3</sup>        |      | 0,39     | 0,29    | 0,19    |
| Відношення N/P                              |      | 4,57     | 2,91    | 1,55    |

Таблиця 3.1.5.

Якість води за відомчою інформацією Мінприроди за 2010-2012 роки, р.

Харків, Трав'янське водосховище, гребля

| Показник                                     | ПДКр | максимум | середня | мінімум |
|--|------|----------|---------|---------|
| Температура, °С                              | -    | 26,00    | 13,83   | 3,50    |
| Зважені речовини, мг/дм <sup>3</sup>         | -    | 21,60    | 9,78    | 2,40    |
| рН   | 8,5  | 8,40     | 8,21    | 8,12    |
| Сума іонів, мг/дм <sup>3</sup>               | -    | 500,0    | 490,0   | 475,0   |
| Кисень, мг/дм <sup>3</sup>                   | 6    | 7,41     | 7,15    | 6,92    |
| Насичення киснем, %                          | -    | 86,6     | 69,5    | 55,7    |
| БСК5, мгО2/дм <sup>3</sup>                   | 3    | 3,45     | 3,05    | 2,32    |
| ХСК, мгО2/дм <sup>3</sup>                    | 50   | 26,50    | 23,00   | 18,00   |
| Хлориди, мг/дм <sup>3</sup>                  | 300  | 26,85    | 19,57   | 15,50   |
| Сульфати, мг/дм <sup>3</sup>                 | 100  | 123,63   | 113,02  | 101,40  |
| Магній, мг/дм <sup>3</sup>                   | 40   | 30,40    | 27,05   | 23,10   |
| Кальцій, мг/дм <sup>3</sup>                  | 180  | 71,90    | 68,22   | 59,16   |
| Загальна жорсткість, мг-е кв/дм <sup>3</sup> | -    | 5,90     | 5,68    | 5,40    |
| Лужність                                     | -    | 6,00     | 5,80    | 5,70    |
| Азот амонійний, мгN/дм <sup>3</sup>          | 0,5  | 0,28     | 0,26    | 0,23    |
| Азот нітритний, мгN/дм <sup>3</sup>          | 0,02 | 0,021    | 0,017   | 0,006   |
| Азот нітратний, мгN/дм <sup>3</sup>          | 9    | 0,31     | 0,25    | 0,22    |
| Азот мінеральний (сум), мгN/дм <sup>3</sup>  | -    | 0,56     | 0,52    | 0,51    |
| Фосфати, мг/дм <sup>3</sup>                  | 2,1  | 1,45     | 0,74    | 0,41    |
| Фосфор фосфатів, мгP/дм <sup>3</sup>         | -    | 0,47     | 0,24    | 0,13    |
| Відношення N/P                               | -    | 3,78     | 2,70    | 1,09    |

Таблиця 3.1.6.

Якість води Трав'янського водосховища за відомчою інформацією

Держводгоспу, 2014 рік

| Показник                   | РН          | Сl,<br>мг/дм3 | SO <sub>4</sub><br>мг/дм3 | Мінералізація<br>, мг/дм3 | NH <sub>4</sub><br>мг/дм3 | NO <sub>2</sub><br>мг/дм3 | NO <sub>3</sub><br>мг/дм3 |
|----------------------------|-------------|---------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 28.04.2011                 | 8,42        | 23,80         | 209,28                    | 707,0                     | 0,150                     | 0,070                     | 0,3                       |
| 02.06.2011                 | 7,15        | 28,00         | 119,04                    | 607,0                     | 0,400                     | 0,030                     | 1,0                       |
| 14.09.2011                 | 7,67        | 28,00         | 210,24                    | 711,0                     | 0,310                     | 0,090                     | 4,0                       |
| 19.04.2012                 | 8,05        | 23,80         | 75,36                     | 563,0                     | 0,180                     | 0,010                     | 2,0                       |
| 14.06.2012                 | 8,37        | 23,80         | 79,68                     | 624,0                     | 0,120                     | 0,130                     | 3,0                       |
| 29.08.2012                 | 6,90        | 46,20         | 146,40                    | 1050,0                    | 7,850                     | 0,220                     | 2,0                       |
| 18.06.2013                 | 8,88        | 19,60         | 133,92                    | 651,0                     | 0,280                     | 0,192                     | 2,0                       |
| 18.06.2014                 | 8,40        | 22,40         | 229,92                    | 833,0                     | 0,220                     | 0,004                     | 0,2                       |
| 09.09.2014                 | 8,33        | 23,80         | 216,5                     | 685,0                     | 0,160                     | 0,103                     | 2,2                       |
| 13.05.2015                 | 8,36        | 25,20         | 289,0                     | 830,0                     | 0,200                     | 0,020                     | 1,2                       |
| Максимум                   | 8,88        | 46,20         | 289,0                     | 1050,00                   | 7,850                     | 0,220                     | 4,00                      |
| Середнє                    | 8,05        | 26,46         | 170,9                     | 726,10                    | 0,987                     | 0,087                     | 1,79                      |
| Мінімум                    | 6,90        | 19,60         | 75,36                     | 563,00                    | 0,120                     | 0,004                     | 0,20                      |
| Кордон 3 та<br>4 категорій | 6,6-<br>8,1 | 75,00         | 100,00                    | 1000,00                   | -                         | -                         | -                         |
| ПДКр                       | 6,5-<br>8,5 | 300,00        | 100,00                    | -                         | -                         | -                         | -                         |
| Ie (макс.)                 | 7           | 3             | 6                         | 4                         | -                         | -                         | -                         |
| Ie (середн.)               | 3,8         | 2,0           | 4,9                       | 2,4                       | -                         | -                         | -                         |

Таблиця 3.1.7.

Якість води Трав'янського водосховища, дані УКРНДІЕП, 2016 рік

| Показник   | Величина | Кратність ПДКр | Екологічний індекс |
|--|----------|----------------|--------------------|
| Т, °С  | 26,6     | -              | -                  |
| Показник рН  | 8,22     | 0,97           | 4                  |
| TDS, мг/дм <sup>3</sup>                              | 630      | -              | 2                  |
| ПрО <sub>2</sub> мг/дм <sup>3</sup><br>(поверхн.)    | 8,38     | 0,72           | 1                  |
| ПрО <sub>2</sub> мг/дм <sup>3</sup><br>(придонн.)    | 8,00     | 0,75           | 1                  |
| ПрО <sub>2</sub> % (поверхн.)                        | 105,7    | -              | 2                  |
| ПрО <sub>2</sub> % (придонн.)                        | 100,8    | -              | 1                  |
| БСК <sub>1</sub> , мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup> | 0,99     | -              | -                  |
| БСК <sub>5</sub> , мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup> | 2,62     | 0,87           | 4                  |
| РВ <sub>4</sub> -Р, мгР/дм <sup>3</sup>              | 0,155    | 0,23           | 5                  |
| NO <sub>2</sub> -N, мгN/дм <sup>3</sup>              | 0,003    | 0,15           | 2                  |
| NH <sub>4</sub> -N, мгN/дм <sup>3</sup>              | 0,475    | 0,95           | 4                  |
| NO <sub>3</sub> -N, мгN/дм <sup>3</sup>              | 1,650    | 0,18           | 6                  |

Таблиця 3.1.8.

Останні зафіксовані показники якості води Трав'янського водосховища  
(верхів'я водосховища, дані Держводагенства), 2021-2022 роки

| Показник   | Дата       | Значення | ГДК |
|--|------------|----------|-----|
| 1  | 2          | 3        | 4   |
| Азот загальний, мг/дм <sup>3</sup>                   | 12.01.2022 | 1,12     | -   |
| Амоній, мг/дм <sup>3</sup>                           | 12.01.2022 | 0,42     | 0,5 |
| БСК <sub>5</sub>                                     | 12.01.2022 | 3,26     | 3   |
| Завислі р-ни, мг/дм <sup>3</sup>                     | 08.12.2021 | 6,6      | 25  |
| Розчинений кисень, мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup> | 12.01.2022 | 8,68     | -   |
| Нітрати, мг/дм <sup>3</sup>                          | 12.01.2022 | 3,26     | 40  |

Продовження табл. 3.1.9.

| 1                            | 2          | 3      | 4    |
|------------------------------|------------|--------|------|
| Нітриди, мг/дм <sup>3</sup>  | 12.01.2022 | 0,05   | 0,08 |
| Сульфати, мг/дм <sup>3</sup> | 08.12.2022 | 143,85 | 500  |
| Фосфати, мг/дм <sup>3</sup>  | 12.01.2022 | 0,98   | 2,1  |
| Хлориди, мг/дм <sup>3</sup>  | 08.12.2022 | 35,49  | 300  |

Узагальнюючи наведені у таблицях показники, можемо відстежити багаторічні зміни хімічного складу води водосховища, представлені на Рис. 3.1.1.

### Хімічний склад води Трав'янського водосховища, 1998-2022 роки

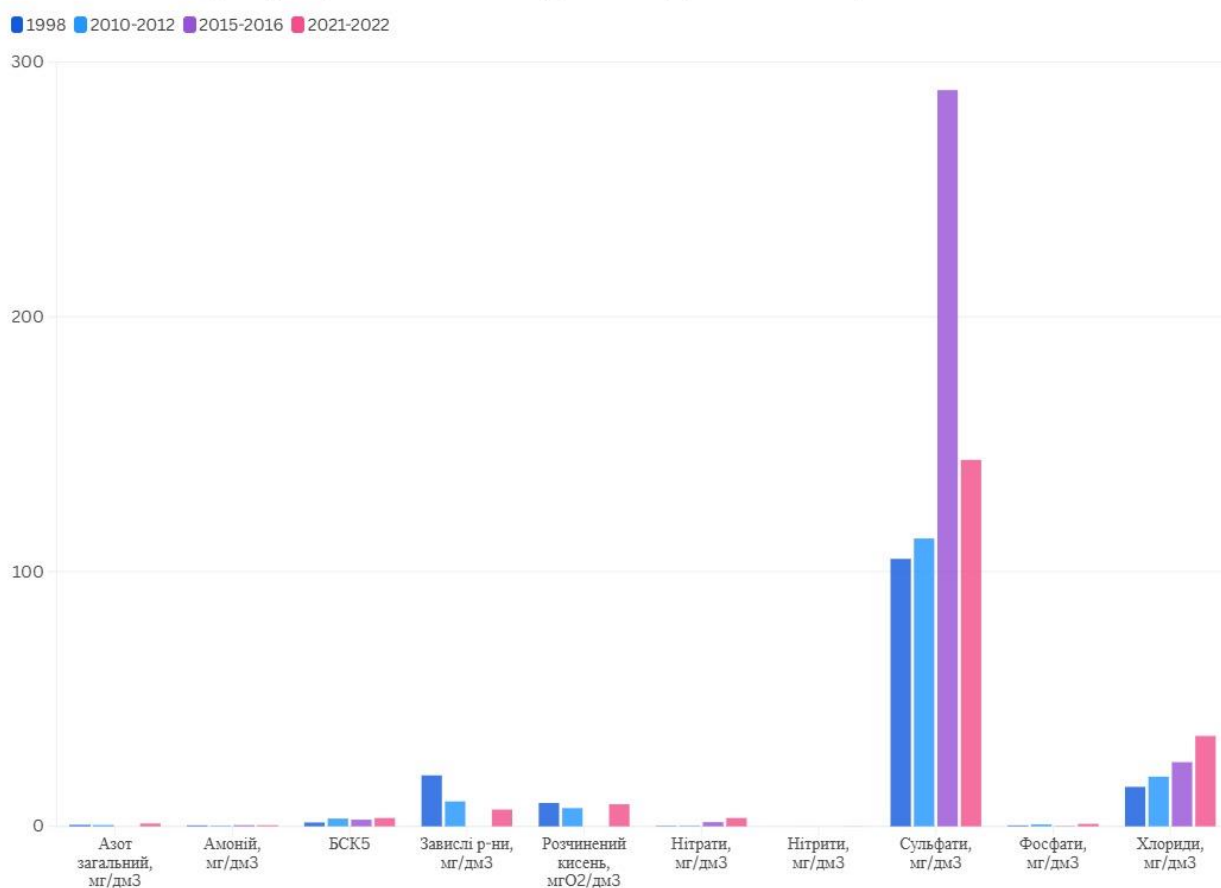


Рис. 3.1.1. Багаторічні зміни основних гідрохімічних параметрів Трав'янського водосховища (1998-2022 рр.)

На підставі аналізу представленої багаторічної інформації щодо гідрохімічного стану Трав'янського водосховища можна констатувати наступне:

1. В окремі періоди спостерігалися значні підвищення вмісту сполук азоту, який у даній водоймі є основним елементом, що лімітує розвиток продуцентів,

насамперед фітопланктону. Індекси екологічної оцінки могли досягати дуже високих значень. Це може свідчити про значну евтрофікацію водойми та високу ймовірність розвитку «цвітіння» води, а також негативних супутніх процесів. Підвищення значення біологічного споживання кисню вказує на розвиток тваринного світу, що проявляється передусім у збільшенні кількості зообентосу, враховуючи основне призначення водосховища.

2. Слід також зауважити, що вода, що надходить у водосховище з р. Харків (з території росії), характеризувалася вищими рівнями вмісту більшості сполук біогенних елементів, ніж у водосховищі, що може свідчити про споживання цих сполук біотою водосховища. Окрім того, неможливо повноцінно контролювати джерела забруднення водосховища, розташовані на території сусідньої країни.

3. Водночас спостерігаємо зменшення кількості сульфатів у порівнянні з 2015-2016 роками, що свідчить про ефективність заходів зі зменшення антропогенного впливу на водойм, хоча у той же час підвищення вмісту хлоридів свідчить про підвищення інтенсивності скидання побутових вод у річки, що постачають воду до водосховища.

Через повномасштабне вторгнення є ризик негативних змін у хімічному складі води, пов'язаний із залишками боєприпасів та паливо-мастильних матеріалів, що можуть потрапити у водосховище через поверхневі або ґрунтові води і негативно вплинути на розвиток живих організмів [37]. Тому важливим є проведення нових гідрохімічних та біологічних досліджень на території водосховища, як тільки цьому сприятиме безпекова ситуація. Аналіз супутникових знімків 2022 року дозволяє побачити, що безпосередньо на території водосховища не відбувалося бойових дій, проте, вони мали місце відбуватися у навколишніх районах (Рис. 3.1.2. і 3.1.3.).



Рис. 3.1.2. Трав'янське водосховище та прилеглі території станом на 09.2022



Рис. 3.1.3. Трав'янське водосховище та прилеглі території станом на 06.2022

Детально проаналізувавши знімки можна чітко побачити сліди від руху військової техніки, місця влучання ракет та снарядів, наслідки локальних пожеж. Втім, лише після закінчення бойових дій можна дати точну оцінку їх впливу на

екологічний та загальний стан Трав'янського водосховища. Близькість до районів ведення бойових дій та державного кордону значно впливає на кількість та точність актуальних даних, в тому числі необхідних для моделювання прориву дамби у подальших розділах, що допускає наявність неточностей у моделюванні та відкриває ширші можливості для подальшого вдосконалення моделі.

### 3.2. Комп'ютерне моделювання наслідків руйнування дамби Трав'янського водосховища

З огляду на мету роботи – картографічне моделювання імовірних зон ризику затоплення нижче за течією річки Харків у разі руйнування дамби Трав'янського водосховища – до моделі висуваються такі вимоги:

- можливість виконання нестационарного (unsteady) гідравлічного розрахунку при сценарії прориву дамби;
- інтеграція з геоінформаційними системами та цифровими моделями рельєфу (ЦМР) для подальшого картографування зон затоплення;
- наявність позитивного досвіду застосування у світових дослідженнях моделювання наслідків руйнування дамб [7; 8; 15; 17; 27].

У зв'язку з цим як основне середовище моделювання було обрано програмне забезпечення HEC-RAS v6.6 (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System), розроблене інженерним корпусом армії США [52]. Переваги HEC-RAS у контексті даного дослідження наступні:

- поширена міжнародна практика застосування для 1D та 2D моделювання прориву дамб, що підтверджено численними роботами (у тому числі на прикладі Каховської ГЕС та інших випадках, розглянутих у попередніх розділах [8; 15; 23; 24]);
- вбудовані алгоритми розрахунку гідрографа прориву та параметрів утворення розлому, які узгоджуються з класичними підходами

МакДоналда – Ленгридж-Монополіс, Фройліха, Ванга та інших [1; 2; 5; 27];

- наявність ГІС-модуля RAS Mapper, що дозволяє безпосередньо в середовищі HEC-RAS формувати растрові та векторні карти глибини, швидкості потоку, часу прибуття хвилі, а далі експортувати їх у форматі, адаптованому під використання у ArcGIS;
- безкоштовна ліцензія, простота інтеграції з відкритими ЦМР (SRTM, ASTER GDEM, національні висотні моделі).

З урахуванням масштабів досліджуваної ділянки (від дамби Трав'янського водосховища до північної околиці м. Харків), особливостей долини річки Харків, у роботі використано двовимірне (2D) моделювання способом Storage area to 2D Flow area, що, з однієї сторони, дає можливість проводити моделювання достатньо швидко, порівняно з іншими методами, але, водночас, не може забезпечити високої точності результатів, через що модель потребує додаткового коригування шляхом використання теоретико-аналітичного моделювання, в тому числі використаного у роботах, згаданих у попередніх розділах. Втім, на поточному етапі роботи даний спосіб показує себе як найбільш оптимальний.

У перспективі модель може бути вдосконалена шляхом використання інших способів, зокрема шляхом моделювання через поперечні перерізи (cross sections), і поєднання кількох підходів у формуванні геометрії моделі, але для цього необхідною є наявність точних даних гідрографа та додаткової інформації, що потребує проведення польових досліджень.

Основні вихідні дані, що були використані для побудови моделі:

- цифрова модель рельєфу (ЦМР) з роздільною здатністю 10 метрів, отримана шляхом комбінування відкритих глобальних даних (SRTM) та уточнення за топографічними картами масштабу 1:25 000 – 1:50 000;
- векторні шари річкової мережі, берегової лінії водосховища, меж заплави, отримані шляхом векторизації за супутниковими знімками та топографічними картами;

- технічні та гідроморфологічні характеристики водосховища та дамби (геометричні параметри греблі, відмітки НПР і ФПР, корисний об'єм, площа, висотні відмітки русла нижче дамби) [31; 33; 43];
- емпірично оцінені параметри розлому при руйнуванні дамби за моделями МакДоналда – Лангридж-Монополіс, Фройліха та інших [1; 2; 5; 27].

Підготовчий етап моделювання включав у себе декілька послідовних блоків робіт. На основі відкритих даних сервісу Earth Explorer [62] було завантажено висотну модель (цифрова модель рельєфу, дані SRTM – Shuttle Radar Topography Mission) для території Трав'янського водосховища, його водозбору та ділянки річки Харків від державного кордону до межі міста Харків. Висотні дані були обрізані за межами досліджуваної території для зменшення обсягу розрахунків. В середовищі ArcGIS виконано попередню фільтрацію та згладжування локальних артефактів у растрі, проведено корекцію висот долини річки у місцях, де сенсори, встановлені на супутнику, «переоцінювали» висоти місцевості (вплив дерев, штучних споруд тощо), що однозначно мало позитивний ефект для покращення точності підсумкової моделі, перерахунок у єдину систему координат WGS 1984 World Mercator, що відповідає системі координат базової карти, на основі якої відбувається векторизація растрових даних.

У результаті поглибленої обробки вхідних даних було отримано цифрову модель рельєфу (ЦМР) місцевості дослідження із просторовою роздільною здатністю 10 метрів, що є придатною для моделювання і подальшої розробки карт зон затоплення. Цифрова модель була експортована у середовище HEC-RAS через вбудований алгоритм конвертації та доступна для перегляду у модулі RAS Mapper та Geometry editor (Рис. 3.2.1).

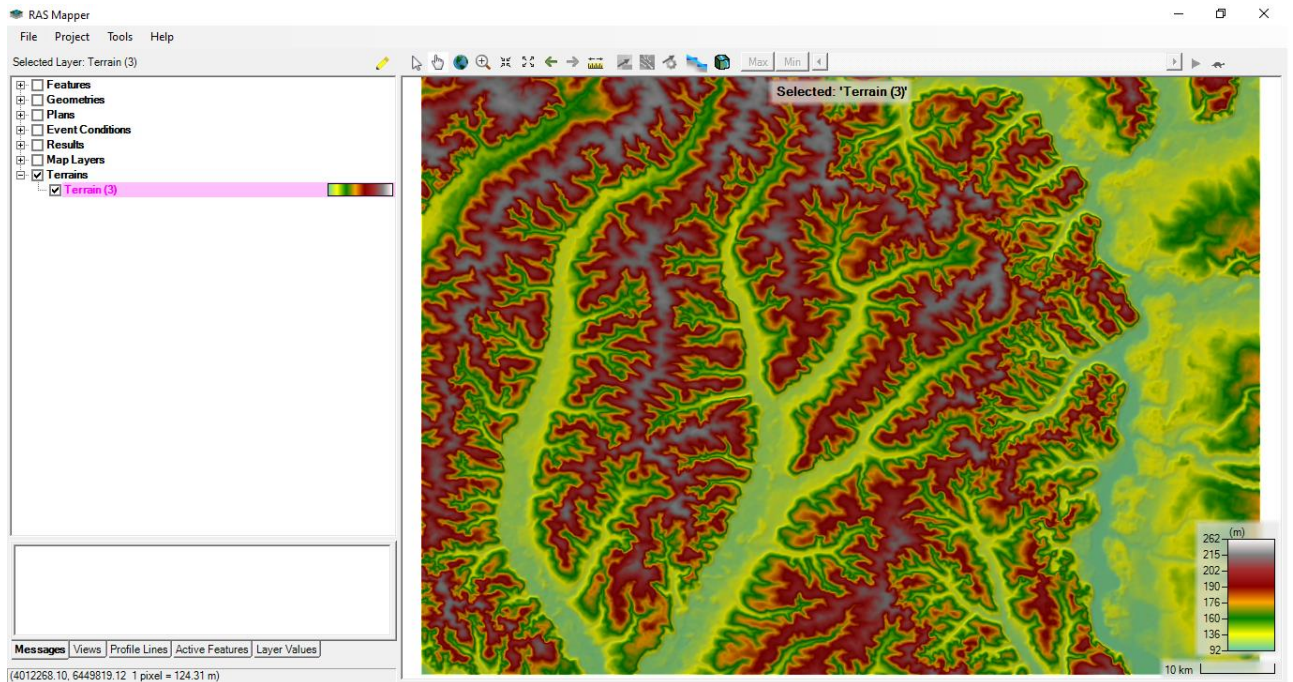


Рис. 3.2.1. Цифрова модель рельєфу долини річки Харків та Трав'янського водосховища (фрагмент, вигляд у середовищі RAS Mapper).

Подальші дії в середовищі ArcGIS включали векторизацію берегової лінії Трав'янського водосховища та русла річки Харків, що відбувалося на основі космічних знімків і топографічних даних, та імпорт файлу проекції для використання у середовищі HEC-RAS.

Наступний етап полягав у перенесенні цифрових даних до середовища HEC-RAS, шляхом імпорту та конвертації шейпфайлів та растрових даних, і їх підготовка до використання у побудові моделі. Зокрема, було створено Storage area (зона накопичення води) на основі векторних даних акваторії водосховища. Перед цим було задано єдину проекцію для всіх шарів даних. Також у HEC-RAS (ГІС-модуль RAS Mapper) вручну було створено 2D Flow area (зона затоплення), яка із запасом охоплює територію річкової долини, і саме в її межах відбувається розрахунок напрямку течії та інших параметрів затоплення. У місці розташування дамби було створено SA/2D Connection (з'єднання між зоною накопичення води та зоною затоплення), що і являє собою оцифровану версію дамби. В якості допоміжного шару було додано базову карту (basemap) на основі космічних знімків Google. Таким чином, було підготовано усі необхідні дані

геометрії для подальших етапів моделювання. Загальний вигляд даних представлений на Рис. 3.2.2 та Рис. 3.2.3.

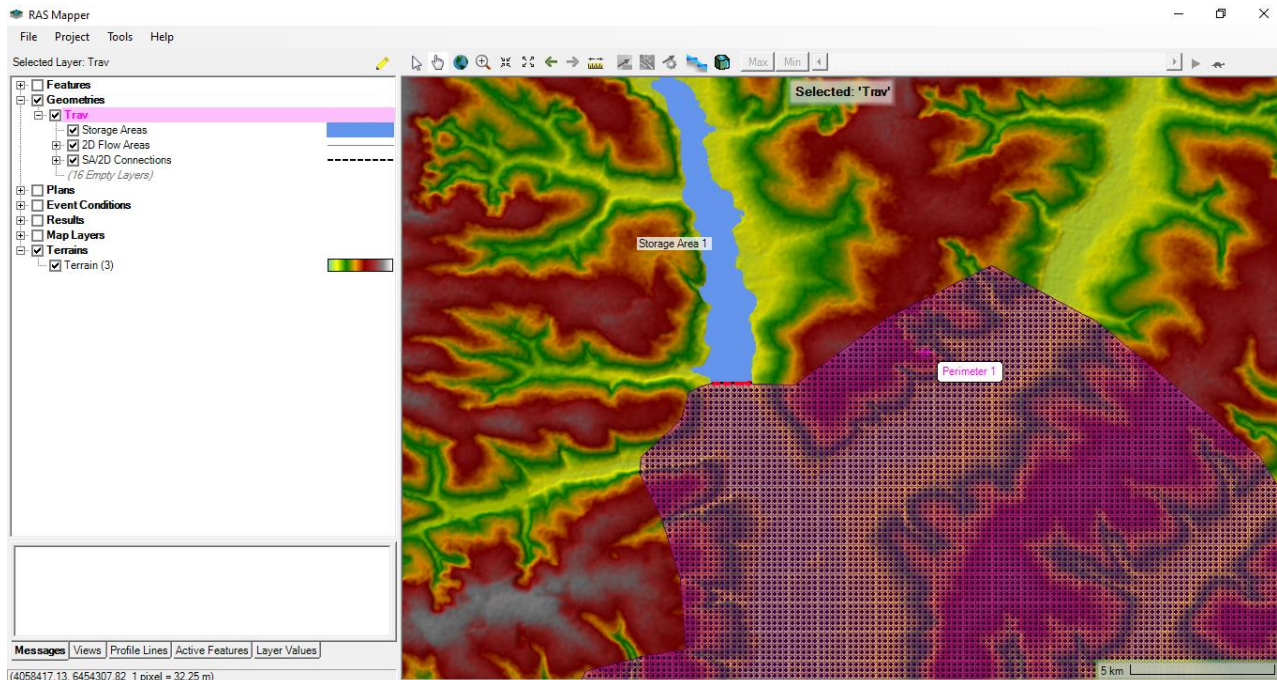


Рис. 3.2.2. Зона накопичення води (Storage Area 1), зона затоплення (2D Flow area або Perimeter 1) та дамба (SA/2D Connection), спроектовані на цифрову модель рельєфу у RAS Mapper.

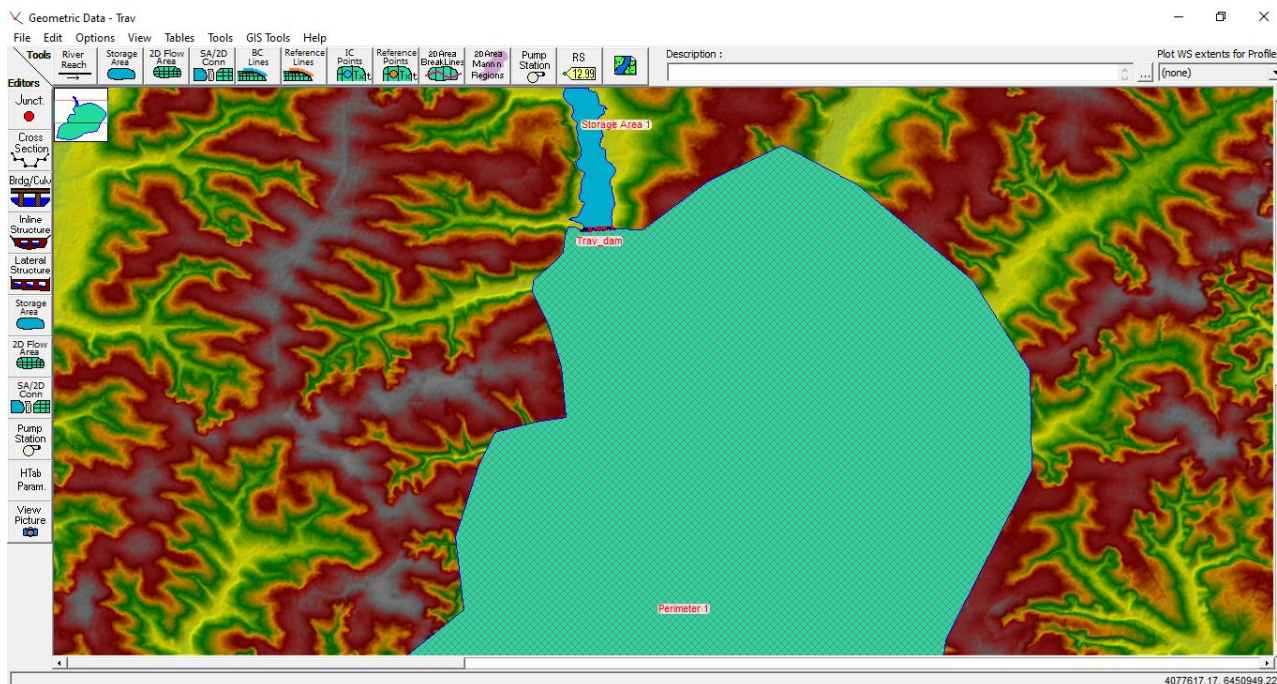


Рис. 3.2.3. Зона накопичення води (Storage Area 1), зона затоплення (2D Flow area або Perimeter 1) та дамба (SA/2D Connection), підготовлені до введення параметрів геометрії.

Далі було проведено підготовчий етап перед початком моделювання, зокрема встановлення параметрів греблі. Для цього у модулі Geometric data (дані геометрії) було виділено дамбу та вручну введено такі параметри як висота гребеня, тип греблі, кути нахилу трапеції (укоси). Після цього було задано параметри руйнування, що є найважливішою частиною, оскільки прямо впливає на результат моделювання. Так, вручну було введено ширину та висоту розлому, час, протягом якого він утворюється, швидкість його утворення, тип розлому. Більшість із цих параметрів було виведено аналітичним способом із ряду робіт, пов'язаних з моделюванням руйнування водосховищ, за своїми параметрами близькими до Трав'янського. За умовою поточного сценарію (вплив бойових дій), руйнування відбувається миттєво, і його зазнає найбільш вразлива частина дамби – водоскид, і воно охоплює щонайменше 1/2 довжини усієї греблі. (Рис. 3.2.3.)

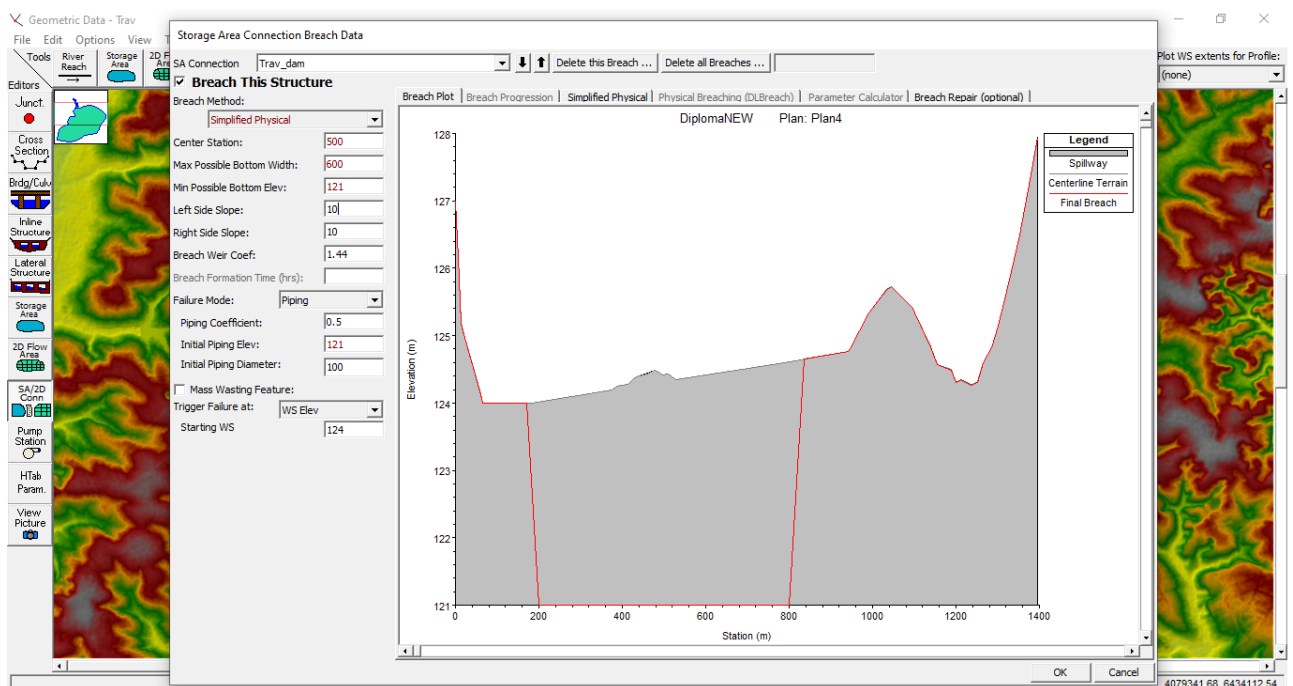


Рис. 3.2.4. Поздовжній профіль дамби та задані параметри руйнування.

Наступним кроком стало встановлення параметрів нестационарного потоку (unsteady flow data). Тут основною задачею було введення початкової висоти

акваторії водосховища (initial condition), та граничних умов внутрішнього притоку (надходження води із річки у водосховище) (Рис. 3.2.5).

Завершальний етап – налаштування аналізу нестационарного потоку (безпосереднього процесу моделювання). Потрібно було проконтролювати, що обрано потрібний набір геометрії, параметрів потоку, встановити набір даних, які буде згенеровано в результаті моделювання, встановити часові рамки та інтервал обробки (Рис. 3.2.6.). Далі запускається процес моделювання, який, залежно від заданих параметрів, відбувається протягом 5-20 хвилин (Рис. 3.2.7.).

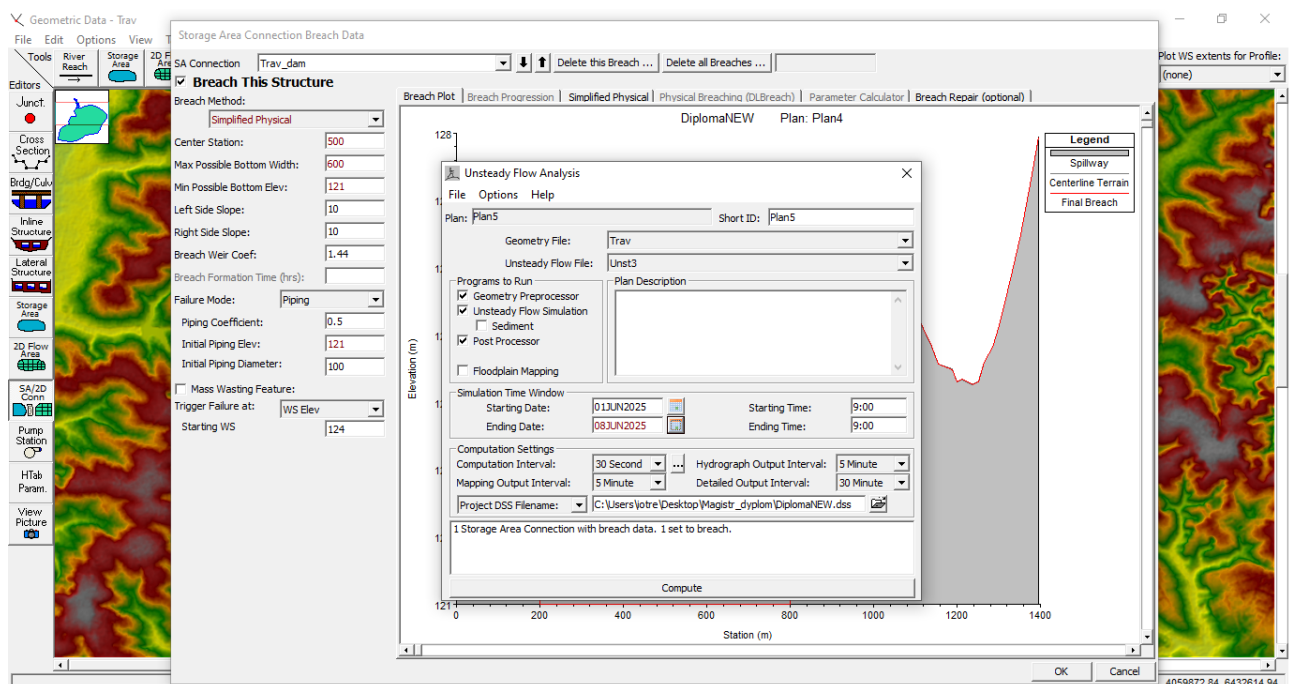


Рис. 3.2.6. Налаштування параметрів аналізу нестационарного потоку.

Частина параметрів аналізу нестационарного потоку була задана на основі доступних джерел інформації про водосховище, частина була встановлена шляхом емпіричної оцінки, даних висот у ЦМР, даних супутникових знімків, що безумовно вплинуло на точність підсумкової моделі.

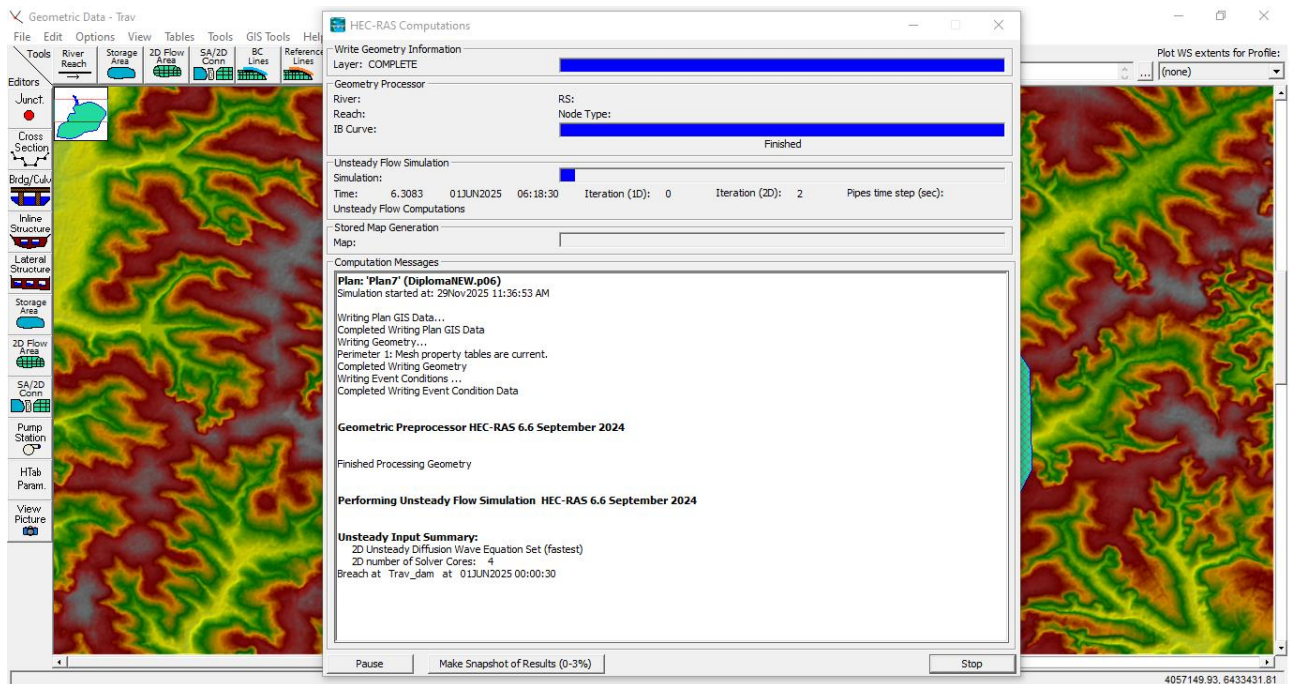


Рис. 3.2.7. Головне вікно контролю процесу моделювання нестационарного потоку.

Після очікування процесу розрахунків та моделювання, що тривав близько двадцяти хвилин, результати моделювання автоматично імпортуються у RAS Mapper у вигляді векторних та растрових шарів. До набору результатів входить картографічна інформація, що відображає швидкість потоку, глибину та час надходження повені, загальну територію затоплення, і може бути імпортована у формат, придатний для відображення та аналізу у ГІС. Також є можливість відобразити просторово-часову інформацію за допомогою функції анімації, яка наочно демонструє те, як буде поширюватися повінь. Окрім картографічних даних, формується звіт у вигляді графіків і таблиць, які демонструють зміну швидкості потоку та площі затоплення залежно від часу. Узагальнений вигляд результатів моделювання показано на Рис. 3.2.8. – 3.2.10.

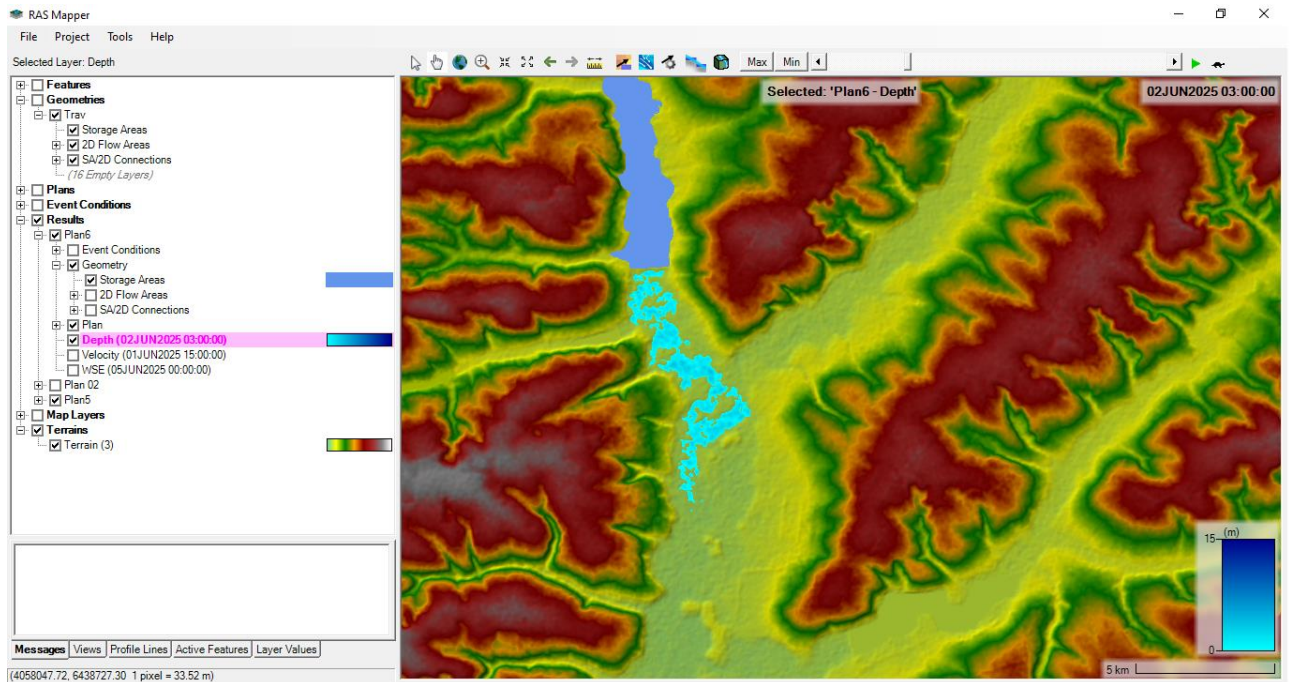


Рис. 3.2.8. Інформація про глибину повені (30 хвилин після руйнування), накладена на цифрову модель рельєфу у RAS Mapper.

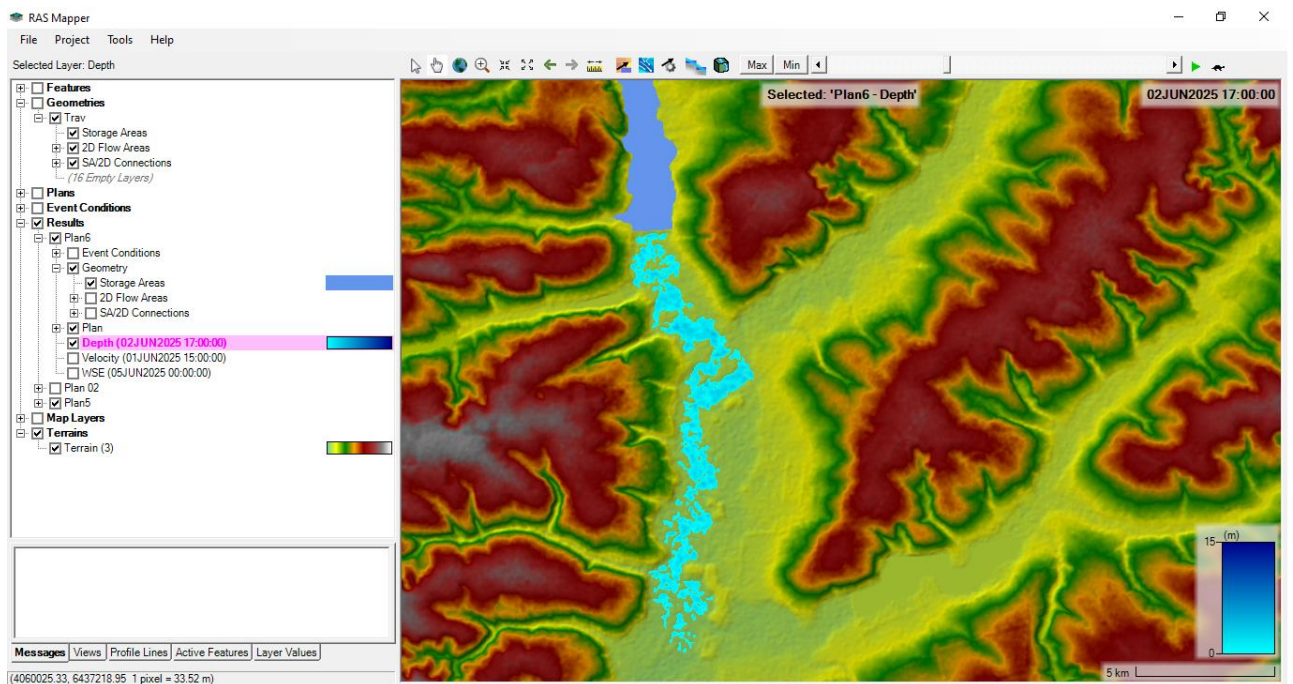


Рис. 3.2.9. Інформація про глибину повені (1 година після руйнування), накладена на цифрову модель рельєфу у RAS Mapper.

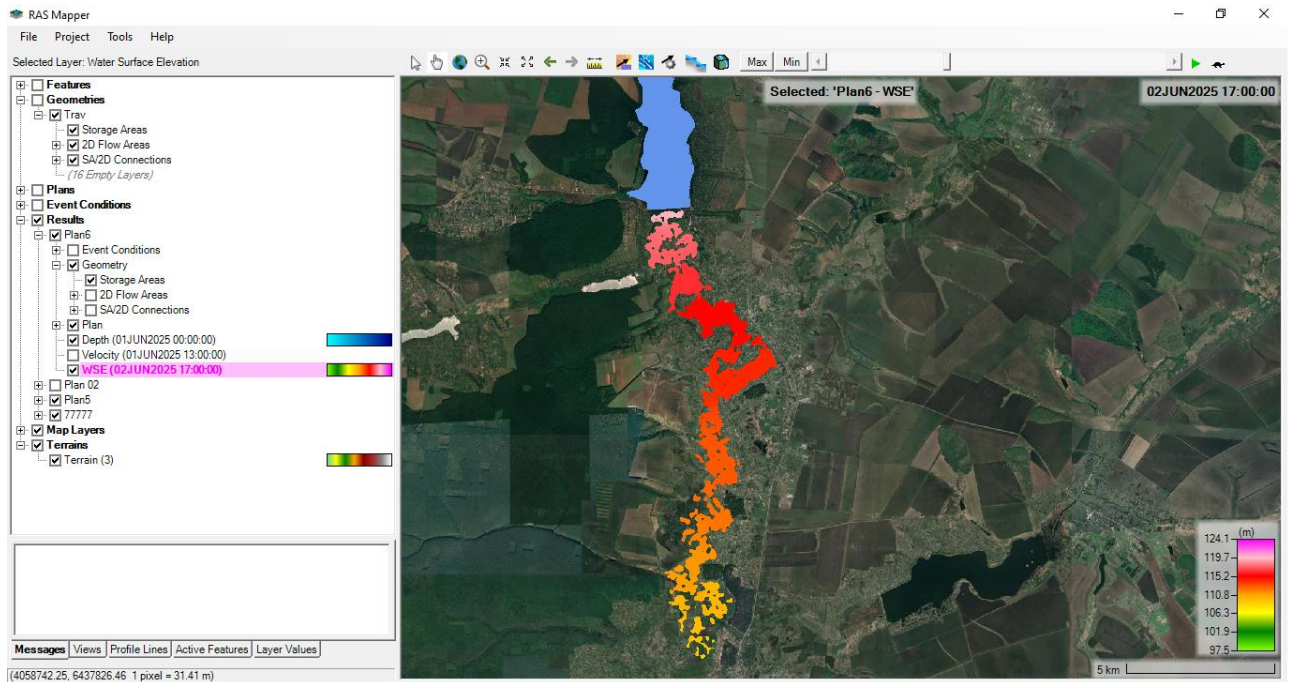


Рис. 3.2.10. Інформація про швидкість потоку (2 години після руйнування), накладена на базову карту супутникових знімків.

Отримана шляхом моделювання інформація дає змогу оцінити, які території нижче Трав'янського водосховища мають ризик затоплення, за який час після руйнування дамби це може відбутися, яка може бути швидкість поширення повені, якою буде її висота. В результаті моделювання було створено повноцінну основу для подальшої розробки карт зон ризику, а також для формулювання попередніх висновків щодо можливих екологічних, економічних та соціальних наслідків такого інциденту. Формат вихідних даних дозволяє імпортувати їх як у растровому (розширення .vrt, .tif), так і у векторному (розширення .shp) форматі, що робить їх певною мірою універсальними, і дозволяє проводити аналіз не лише у середовищі ArcGIS, але також у інших програмних комплексах, зокрема у MapInfo, QGIS, GRASS, та напряду у створенні онлайн-карт, що робить можливим також проводити їх оновлення у картографічних веб-сервісах в режимі реального часу.

### 3.3. Розробка карт зон ризику внаслідок руйнування дамби Трав'янського водосховища

Кarti зон ризику були укладені у програмному середовищі ArcGIS на основі результатів комп'ютерного моделювання, проведеного у попередньому підпункті, а також із застосуванням аналітичних інструментів та емпіричних оцінок, представлених в тому числі у роботах, розглянутих у підпунктах другого розділу [4; 5; 6; 18; 27].

Шари геопросторових даних, отримані у середовищі HEC-RAS були імпортовані у формат, придатний для подальшого опрацювання інструментами ГІС у вигляді шейпфайлів (формат .shp). До цього набору даних було додано вже існуючі векторні шари русла річки Харків і Трав'янського водосховища, растровий шар цифрової моделі рельєфу та дві базові карти (також растрові дані) – супутникових знімків Google та картографічну підкладку Open Street Map (OSM). На основі цієї підкладки було створено (оцифровано) додаткові векторні шари картографічної основи, що включають у себе мережу доріг, мости, населені пункти, лісові масиви, сільськогосподарські підприємства. У якості фонові основи було використано цифрову модель рельєфу, оскільки таким чином можна простежувати зв'язок між районами затоплення, висотою повені і абсолютною висотою місцевості. Після налаштування зовнішнього вигляду було проведено їх аналіз та коригування на основі досвіду схожих робіт у сфері моделювання зон ризику, в тому числі тих, що були розглянуті у попередніх розділах. В результаті укладено серію із п'яти карт, що дозволяють отримати всебічне уявлення про можливі наслідки руйнування дамби Трав'янського водосховища та імовірні зони ризику в результаті такого інциденту. Підсумковий вигляд картографічних матеріалів представлений на Рис. 3.3.1. – 3.3.5.

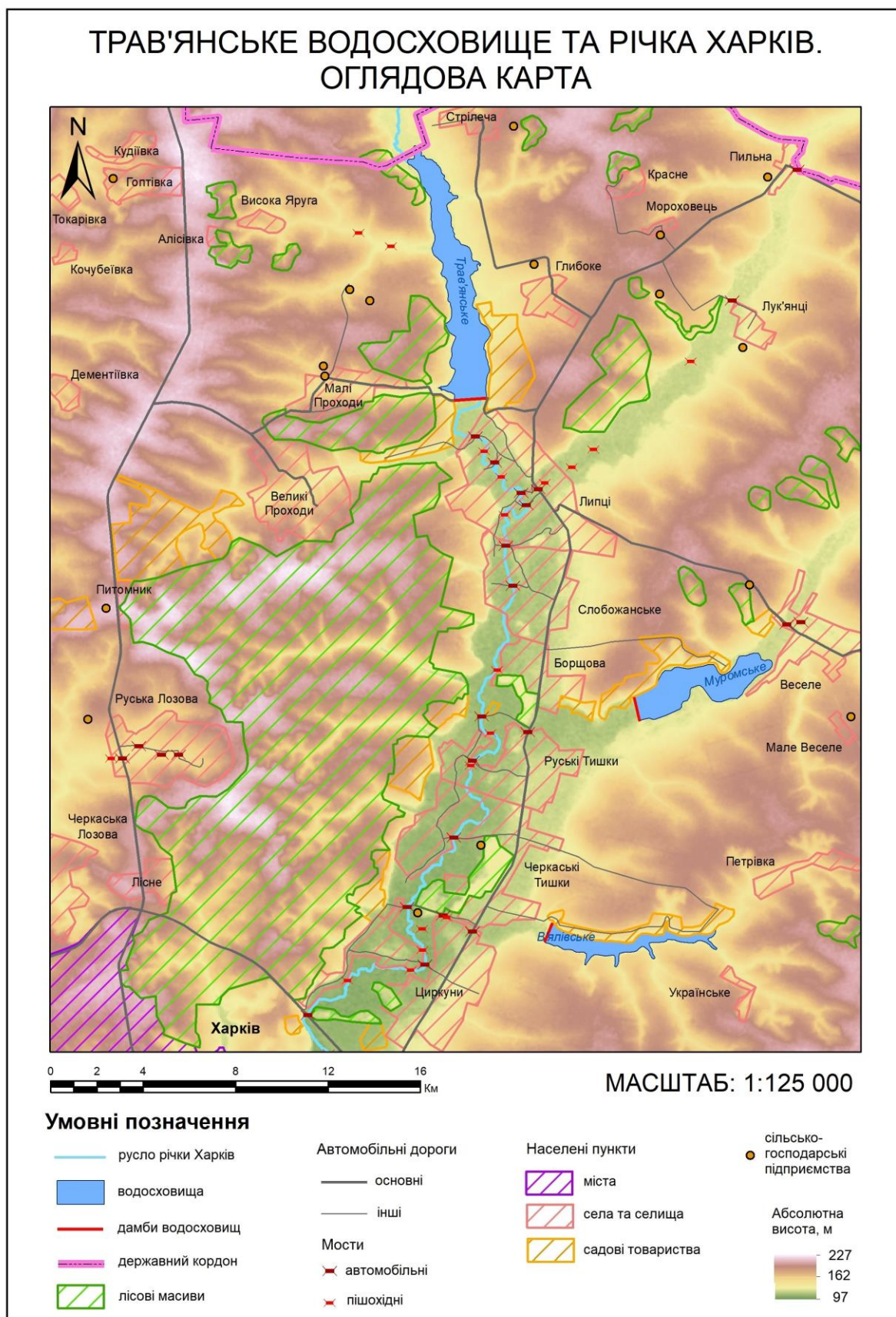


Рис. 3.3.1. Карта «Трав'янське водосховище та річка Харків. Оглядова карта»

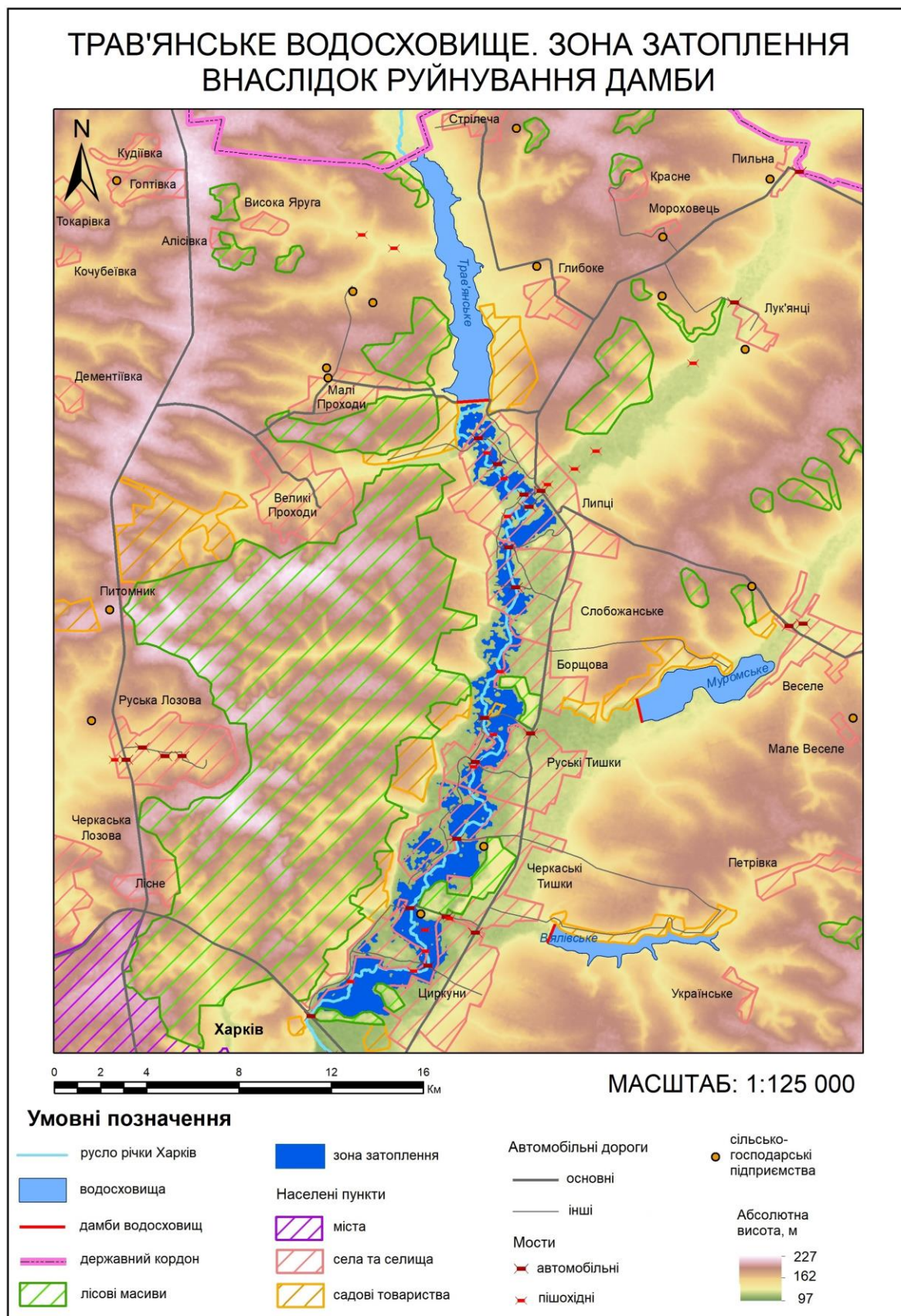


Рис. 3.3.2. Карта «Трав'янське водосховище. Зона затоплення внаслідок руйнування дамби».

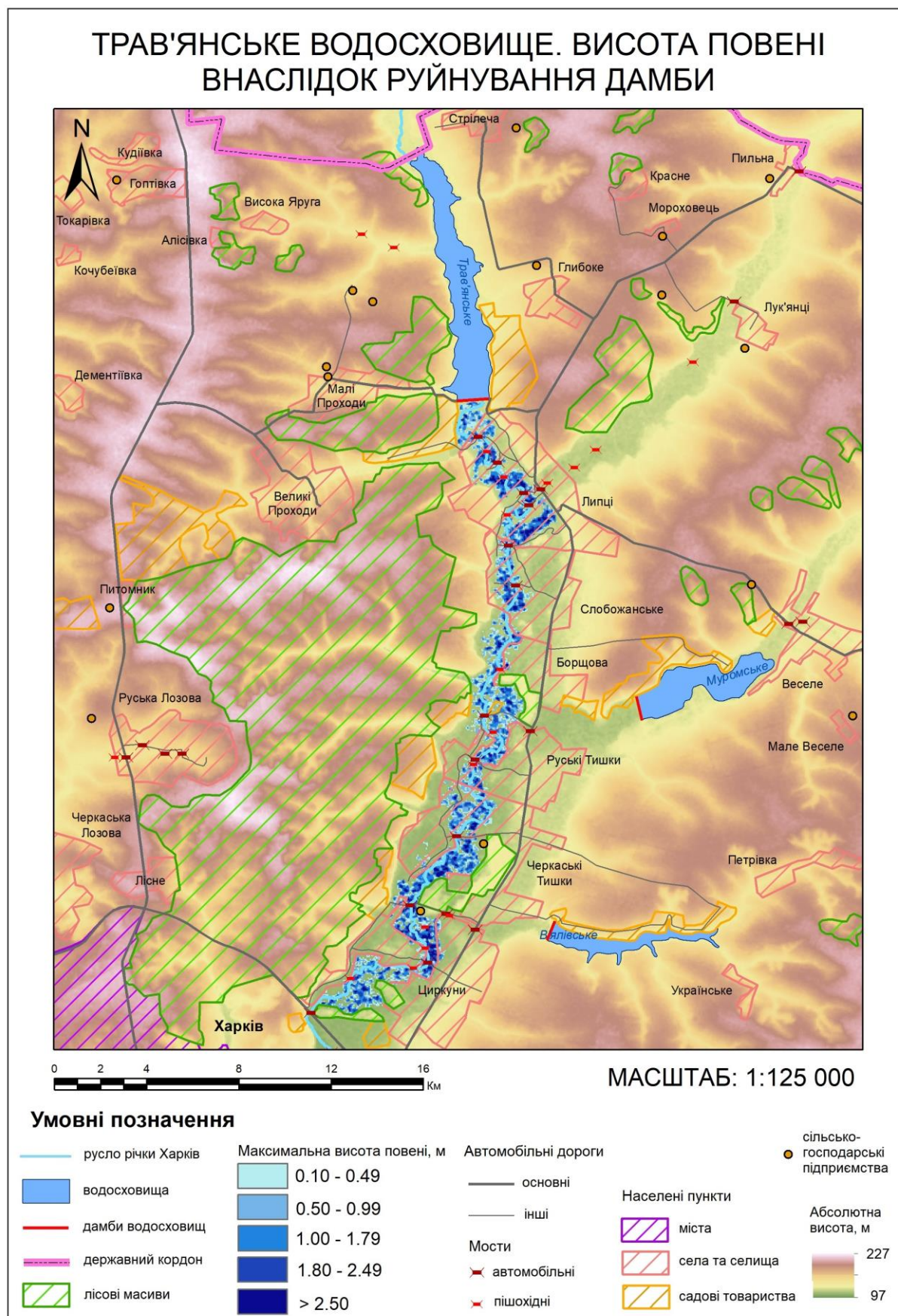


Рис. 3.3.3. Карта «Трав'янське водосховище. Висота повені внаслідок руйнування дамби».

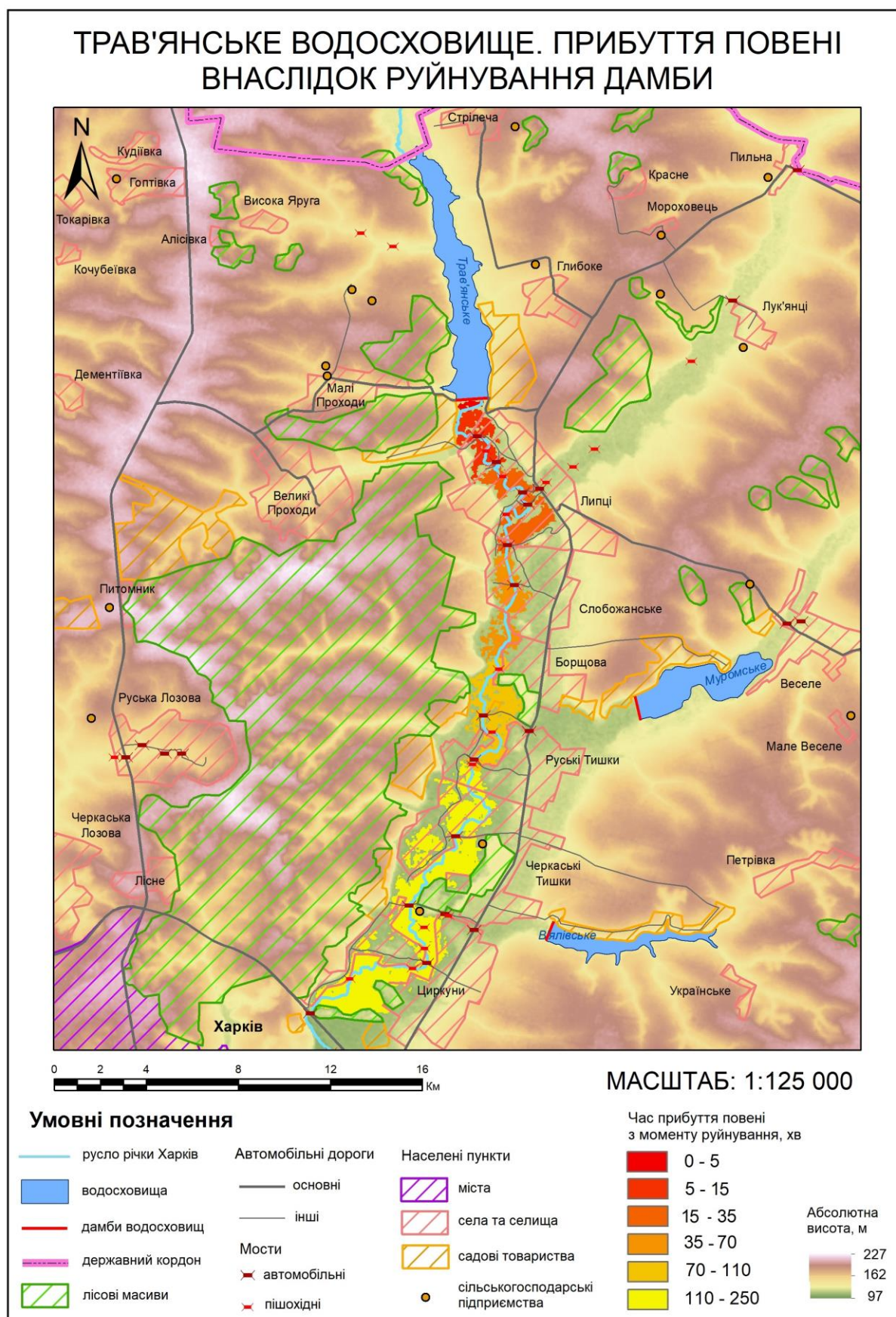


Рис. 3.3.4. Карта «Трав'янське водосховище. Прибуття повені внаслідок руйнування дамби».

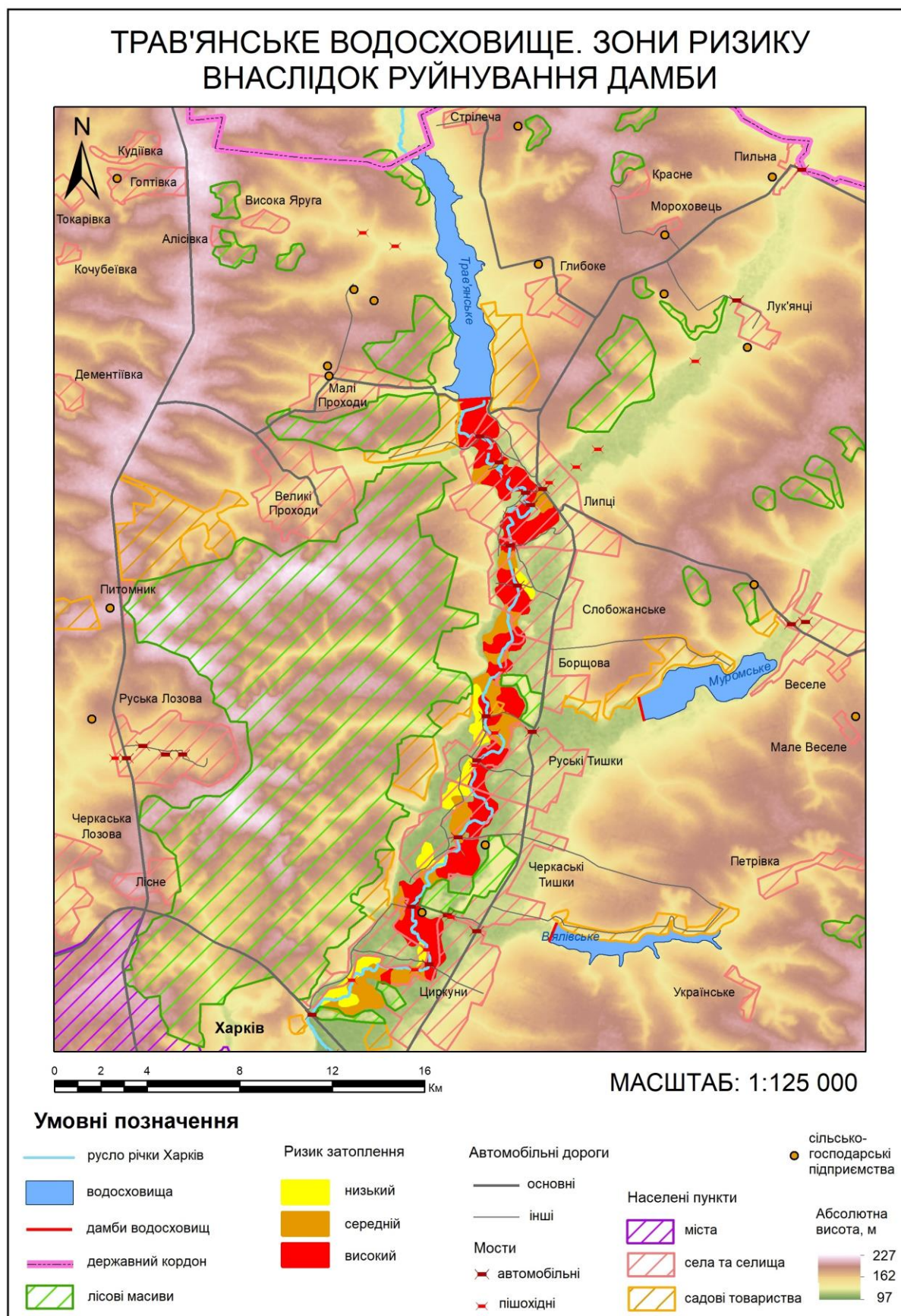


Рис. 3.3.5. Карта «Трав'янське водосховище. Зони ризику затоплення внаслідок руйнування дамби».

Карта «Трав'янське водосховище та річка Харків. Оглядова карта» створена з метою отримати загальне уявлення про місцевість дослідження, зокрема про розташування русла і долини річки Харків, Трав'янського водосховища, населених пунктів, лісових масивів та шляхів сполучення. Цю карту можна також порівнювати з іншими для того, щоб оцінити масштаби затоплення та зрозуміти, які саме райони охоплює зона затоплення. Окрім цього, дана карта використовується як базова при укладанні подальших карт.

Карта «Трав'янське водосховище. Зона затоплення внаслідок руйнування дамби» методом ареалів демонструє ті райони, що опиняться у зоні затоплення внаслідок руйнування дамби. Ця карта також дає змогу оцінити масштаби інциденту та простежити закономірність у поширенні зони затоплення вздовж течії річки Харків. Загальна площа затоплення на основі цієї карти оцінюється у 15 км<sup>2</sup>.

Карта «Трав'янське водосховище. Максимальна висота повені внаслідок руйнування дамби» за допомогою методу кількісного фону демонструє показники максимальної глибини затоплення, що дає змогу визначити, які території можуть найбільше постраждати під час інциденту, і є однією з карт, за якими була сформована карта зон ризику. Зокрема можна побачити, що найбільше затоплення буде притаманне територіям вздовж русла річки Харків, і частково охоплюватиме території населених пунктів Липці, Слобожанське, Борщова, Руські Тишки, Черкаські Тишки та Циркуни, що розташовані у низовинах безпосередньо поруч із річкою.

Основним методом картографічного зображення карти «Трав'янське водосховище. Прибуття повені внаслідок руйнування дамби» також є кількісний фон, але тепер основна інформація – це час, протягом якого повинь прийде до певного району в межах зони затоплення. Частково для укладання карти використовується емпірична оцінка швидкості течії, оскільки дані, отримані шляхом моделювання, достатньо відрізняються від показників, притаманних для подібних водосховищ, розглянутих в роботах інших дослідників.

Особливу увагу слід приділити карті «Трав'янське водосховище. Зони ризику внаслідок руйнування дамби», оскільки вона була укладена не тільки на основі даних комп'ютерного моделювання (швидкість течії, глибина), а також шляхом використання теоретико-аналітичних підходів на основі досвіду укладання подібних карт іншими авторами (зокрема, емпірична оцінка тривалості повені). Таким чином, було виділено три основні зони ризику:

- низький ризик: у цих зонах висота повені не перевищує 1м, швидкість течії оцінюється менше 1 м/с, відповідно, у цих зонах будуть відсутні катастрофічні наслідки, натомість, затоплення може мати довгостроковий ефект, спричинивши, наприклад зсуви ґрунту, заболочування, вторинне забруднення;
- середній ризик: у цих зонах висота повені знаходиться у діапазоні від 1 до 2 метрів, рухаючись зі швидкістю від 1 до 2 м/с, але попри це не затримується довго, і здатна спричинити помірні наслідки, такі як пошкодження підвальних приміщень, техніки, дорожнього полотна, ускладнення переміщення по території;
- високий ризик: у цих зонах висота повені перевищує 2 метри, а швидкість течії складає понад 2 м/с, що може призвести до таких наслідків як суттєве затоплення перших поверхів будівель, ускладнення роботи систем життєзабезпечення і може включати необхідність евакуації населення.

Проаналізувавши наведені картографічні твори можемо констатувати, що до території затоплення входять не лише природні та антропогенні ландшафти, але також і частини населених пунктів, таких як Липці, Слобожанське, Борщова, Руські Тишки, Черкаські Тишки та Циркуни. Попри те, що основна частина забудови цих населених пунктів знаходиться за межами зони імовірного затоплення, є ряд домогосподарств, які повністю або частково до неї потрапляють, а також ряд ділянок знаходиться на небезпечно близькій відстані. Пов'язано це із тим, що населені пункти розташовані здебільшого на локальних підвищеннях рельєфу, оскільки для річки Харків як і для більшості річок регіону притаманна весняна повінь, що зумовило розташування житла та господарства у

районах, вище за рівень повені. Частина доріг розташована на штучно створених насипах з тієї ж причини, що створює додатковий бар'єр для руху води. У зоні ризику опиняються також території сільськогосподарського підприємства, що може призвести до потрапляння у воду шкідливих речовин та їх перенесення вниз по течії. Зона високого ризику охоплює також близько десяти мостів, серед яких сім – автомобільні, і, відповідно, є загроза їх руйнування, що збільшить витрати на відновлення та створить проблеми для місцевого транспортного сполучення. Місто Харків не потрапляє у зону безпосередньої небезпеки, оскільки знаходиться занадто далеко від водосховища, і припливна хвиля занадто швидко втрачає свій потенціал на рівнинній місцевості, для того щоб спричинити тяжкі або принаймні помітні наслідки в межах міста. Це ж саме стосується і мосту, по якому проходить Окружна дорога, він знаходиться близько до зони низького ризику, і навіть при найгіршому сценарії немає причин прогнозувати його можливе руйнування.

У контексті екологічних наслідків варто зазначити також і території, що знаходяться вище дамби, оскільки її руйнування призведе не лише до затоплення територій вниз по течії, але і до обміління самого водосховища. Найбільш очевидними будуть наслідки для місцевої екосистеми, оскільки водосховище є середовищем існування великої кількості видів водних рослин і тварин, що призведе до значного скорочення видового різноманіття та загальну деградацію біоценозів, і на їх відновлення знадобиться чимало часу та ресурсів. Другий аспект – вплив на життя та господарство людей. Водосховище входить до складу резервного комплексу водопостачання міста Харкова, і є джерелом прісної води для навколишніх поселень, і для підприємств сільського господарства для потреб зрошення. Відповідно, у випадку руйнування буде втрачено значну частину резервних запасів прісної води для багатьох населених пунктів, в тому числі і для міста Харків, що створює додаткові ризики у випадку дефіциту води. Нестача води для потреб сільського господарства зменшить його ефективність, що є важливим аспектом питання продовольчої безпеки. Окрім цього, через падіння

рівня ґрунтових вод, який підтримується завдяки водосховищу, можлива нестача прісної води на місцевому рівні, зокрема у садибних ділянках, розташованих вздовж лівого берегу водосховища, які використовують криниці або неглибокі свердловини як джерело води. Більш широку картину екологічних наслідків можна отримати, залучивши додаткові інструменти моделювання, зокрема аналіз переміщення осадів та ерозійних процесів, 3D моделювання.

Таким чином, розроблена модель та укладені на її основі карти дають змогу отримати комплексне уявлення про можливі масштаби та наслідки інциденту, що може мати місце у випадку руйнування дамби Трав'янського водосховища, оцінити збитки, вплив на навколишнє середовище та людську діяльність, і проводити планування заходів цивільного захисту з метою зменшити негативний вплив потенційного інциденту. Прикладне застосування можливе на рівні органів місцевого самоврядування та спеціалізованих служб, громадських організацій, науковців, що працюють у сфері екології, гідроінженерії, ГІС та картографії.

## ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі було здійснено комплексне дослідження проблеми моделювання імовірних зон ризику внаслідок руйнування дамби Трав'янського водосховища, що має важливе значення для безпеки населення Харківської області та функціонування критичної інфраструктури регіону. Актуальність теми зумовлена як реальним прецедентом руйнування гідротехнічних споруд під час бойових дій (Каховська ГЕС, Оскільське водосховище), так і географічною близькістю Трав'янського водосховища до державного кордону та великого урбанізованого центру — міста Харкова.

В результаті проведеного дослідження отримано такі результати:

1. Встановлено, що сучасні підходи базуються на поєднанні математичного аналізу параметрів прориву, цифрових моделей рельєфу та гідродинамічного моделювання. Значна кількість досліджень зосереджує увагу на точності розрахунків пікових показників потоку та визначенні найбільш вразливих територій. Проаналізовано класичні й сучасні моделі, описані у працях МакДоналда, Фройліха, Пірса, Марнцоні та інших дослідників.

2. Проведене дослідження показало, що міжнародна практика характеризується високим рівнем стандартизації та доступності картографічних продуктів для населення. Зокрема, використання HEC-RAS, MIKE Flood, Delft3D стало загальноприйнятим для моделювання наслідків руйнування дамб. У вітчизняній практиці домінують продукти, створені після руйнування Каховської ГЕС, переважно за ініціативи міжнародних організацій. Це вказує на потребу розвитку власних науково-прикладних рішень у сфері прогнозування підтоплень та картографічного моделювання.

3. Розроблено модель імовірних зон ризику внаслідок руйнування дамби Трав'янського водосховища з використанням принципів гідродинамічного аналізу та програмного середовища HEC-RAS. Створено спрощену модель гідрографії річки Харків, задано параметри дамби та сценарій

прориву, визначено параметри та можливу динаміку руху водного потоку. На основі отриманих результатів розроблено карти, що відображають межі затоплення, висоту повені та містять попередню оцінку ризиків для поселень та транспортної інфраструктури, що розташовані нижче за течією.

4. Отримані результати свідчать, що у випадку руйнування дамби Трав'янського водосховища найбільш вразливими зонами будуть населені пункти, розташовані безпосередньо вздовж русла річки Харків, а у разі масштабного прориву потенційна хвиля може нести загрозу приміським територіям, проте для самого міста ризику підтоплення чи затоплення немає.

Інші (соціальні, економічні, екологічні) наслідки руйнування в даному дослідженні не оцінювались. Сподіваємось, що це буде темою наступної роботи.

Проведене дослідження має як наукове, так і прикладне значення. Результати можуть бути використані органами місцевого самоврядування, службами цивільного захисту, екологами та фахівцями у сфері водного господарства для підготовки до можливих надзвичайних ситуацій. Окрім того, результати можуть бути використані для подальшого розвитку теми, як у напрямку поліпшення точності моделювання на даній місцевості, так і для проведення аналогічних досліджень на інших водосховищах.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. MacDonald, T.C., & Langridge-Monopolis, J. Breaching characteristics of dam failures. *Journal of Hydraulic Engineering.*, 1984. URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1984\)110:5\(567\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:5(567))
2. Froehlich, D.C. Embankment dam breach parameters and their uncertainties. *Journal of Hydraulic Engineering.*, 2008. URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2008\)134:12\(1708\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:12(1708))
3. M. W. Pierce, C. I. Thornton, and S. R. Abt. Predicting peak outflow from breached embankment dams (technical review/report). June 2010. Colorado State University Daryl B. Simons Building at the Engineering Research Center Fort Collins, CO
4. Bates, P.D & Roo, Ad. A Simple Raster-Based Model for Flood Inundation Simulation. *Journal of Hydrology.* 2010. Vol. 236. pages 54-77. 10.1016/S0022-1694(00)00278-X.
5. Bo Wang, Yunliang Chen, Chao Wu, Yong Peng, Jiajun Song, Wenjun Liu, Xin Liu, Empirical and semi-analytical models for predicting peak outflows caused by embankment dam failures, *Journal of Hydrology*, Volume 562, 2018, Pages 692-702, ISSN 0022-1694, URL: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.05.049>.
6. Verma, D.; Berwal, P.; Khan, M.A.; Alharbi, R.S.; Alfaisal, F.M.; Rathnayake, U. Design for the Prediction of Peak Outflow of Embankment Breaching Due to Overtopping by Regression Technique and Modelling. *Water* 2023, 15, 1224. URL: <https://doi.org/10.3390/w15061224>
7. Rizzo, C., Maranzoni, A., & D’Oria, M. (2023). Probabilistic mapping and sensitivity assessment of dam-break flood hazard. *Hydrological Sciences Journal*, 68(5), 700–718. URL: <https://doi.org/10.1080/02626667.2023.2174026>
8. Mo, C., et al. (2023). Simulation of one-dimensional dam-break flood routing with HEC-RAS — case study. *Frontiers in Earth Science*. *Front. Earth Sci.*, 10

January 2023 Sec. Hydrosphere Volume 10 URL:  
<https://doi.org/10.3389/feart.2022.1027788>

9. Francesca Aureli, Andrea Maranzoni, Gabriella Petaccia MDPI Special Issue / 2024 — Advances in Dam-Break Modeling for Flood Hazard Mitigation ISBN 978-3-7258-1152-6, p. 332
10. Строкаль В. П., Бережняк Є. М., Наумовська О. І., Вагалюк Л. В., Ладика М. М., Сербенюк Г. А., Паламарчук С. П., Павлюк С. Д. Вплив російської агресії на стан природних ресурсів України: монографія / За заг. ред. В. П. Строкаль. Київ : Видавничий центр НУБіП України, 2023. 218 с. ISBN 978-617-8351-36-6
11. Строкаль В.П. Шевчук С.А. Затоплення та підтоплення територій: ризики для водної та продовольчої безпеки регіонального рівня. Національний університет біоресурсів і природокористування України, 2023 рік URL: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.4-49.21>
12. Starodubtsev V., Ladyka M. Destruction Of The Kakhovskaya Hydroelectric Power Plant: The Second Aspect Of The Ecological Catastrophe / Proceedings of the XXV International Scientific and Practical Conference “Theoretical Foundations Of Scientists And Modern Opinions Regarding The Implementation Of Modern Trends”, San Francisco, USA June 27-30, 2023, p. 18-23. DOI: 10.46299/ISG.2023.1.25
13. Shumilova, O., Tockner, K., Sukhodolov, A., Khilchevskiy, V., De Meester, L., Stepanenko, S., Gleick, P. (2023). Impact of the Russia–Ukraine armed conflict on water resources and water infrastructure. *Nature Sustainability*, 6(5), p. 578-586. URL: <https://www.nature.com/articles/s41893-023-01068-x>
14. Agerbeek, B., Knepflé, M., Witsenburg, F., & Jonkman, S. N. (2024). Near Real-time Flood Risk Modelling in Response to Increasing Uncertainties in Flood Predictions: Insights from the Kakhovka Dam Breach in Ukraine. *Journal of Coastal and Riverine Flood Risk*, 3. URL: <https://doi.org/10.59490/jcrfr.2024.0016>

15. Kadam, P. B., Thakur, P. K., Dwivedi, S. K., Garg, V., and Dhote, P. R.: Dam Breach Analysis and Damage Assessment of Nova Kakhovka Dam using Satellite data and 1D and 2D Hydrodynamic Modeling, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLVIII-3-2024, p. 251–256, URL: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-3-2024-251-2024>, 2024.
16. Біляєв М. М., Козачина В. В. та ін. Моделювання динаміки ґрунтових вод та їх забруднення. — Український журнал будівництва та архітектури. №2 (020) 2024. URL: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.260324.137.1052>
17. FEMA P-946 — «Inundation Mapping of Flood Risks Associated with Dam Incidents and Failures». Federal Energy Regulatory Commission. URL: <https://www.ferc.gov/media/inundation-mapping-flood-risks-associated-dam-incidents-and-failures-fema-p-946>
18. Tony L. Wahl. Prediction of Embankment Dam Breach Parameters A Literature Review and Needs Assessment DSO-98-004 Water Resources Research Laboratory. July 1998 URL: <https://usbr.gov/ssle/damsafety/TechDev/DSOTechDev/DSO-98-04.pdf?utm>
19. Harvey McLeod, Annika Bjelkevik, Rafael Monroy, Paul Ridlen, Duncan Grant Stewart, David Brett, Jiri Herza, Joaquim Pimenta de Avila, Andy Small and Imran Gillani. ICOLD 2021 ANNUAL MEETING Tailings Dam Safety Bulletin. November 18, 2021 URL: [https://www.barrages-cfbr.eu/IMG/pdf/icold\\_workshop.tailings\\_dam\\_safety\\_bulletin.v1\\_2\\_-\\_may\\_2022.pdf?utm](https://www.barrages-cfbr.eu/IMG/pdf/icold_workshop.tailings_dam_safety_bulletin.v1_2_-_may_2022.pdf?utm)
20. LEROY ANDERSON DAM FLOOD INUNDATION MAPS CA DWR DAM ID# 72-009 SANTA CLARA VALLEY WATER DISTRICT. URL: <https://www.valleywater.org/sites/default/files/Anderson%20Dam%20Inundation%20Maps%202016.pdf?utm>
21. California Department of Water Resources Inundation maps. Веб-ресурс. URL: <https://water.ca.gov/programs/all-programs/division-of-safety-of-dams/inundation-maps?utm>

22. Maranzoni, A., D’Oria, M. & Rizzo, C. Probabilistic mapping of life loss due to dam-break flooding. *Nat Hazards* 120, 2433–2460 (2024). URL: <https://doi.org/10.1007/s11069-023-06285-3>
23. Rapid Environmental Assessment of Kakhovka Dam Breach Ukraine, 2023 United Nations Environment Programme ISBN: 978-92-807-4074-5 URL: [https://unepdhi.org/wp-content/uploads/sites/2/2023/11/UNEP\\_Kakhovka\\_Dam\\_Breach\\_Ukraine\\_Assessment.pdf?utm](https://unepdhi.org/wp-content/uploads/sites/2/2023/11/UNEP_Kakhovka_Dam_Breach_Ukraine_Assessment.pdf?utm)
24. European Commission, Joint Research Centre, Santini, M., Destro, E., Gerhardinger, A., Mastronunzio, M., Salvitti, V. and Tucci, M., Mapping for Crisis Management, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2023, URL: <https://data.europa.eu/doi/10.2760/999619>, JRC136897
25. Nova Kakova Dam Flooding as of June 9, 2023 (ISW Map). Веб-ресурс. URL: <https://www.arcgis.com/apps/instant/media/index.html?appid=d028d8d0ccdc4efe8ddef72f5f52038c&utm>
26. Бабин Яр: 2003—2020. Бізнесмени, історики та громадські діячі не можуть домовитися, як увічнити пам’ять жертв. Інформаційне агенство «Бабель». Веб-ресурс. URL: <https://babel.ua/texts/42864-babin-yar-2003-2020-biznesmeni-istoriki-ta-gromadski-diyachi-ne-mozhut-domovitisya-yak-uvichniti-pam-yat-zhertv-velikiy-ekspleyner-iz-kartami>
27. Tony L. Wahl DAM BREACH MODELING – AN OVERVIEW OF ANALYSIS METHODS Joint Federal Interagency Conference on Sedimentation and Hydrologic Modeling June 27 - July 1, 2010. URL: [https://www.usbr.gov/tsc/techreferences/hydraulics\\_lab/pubs/PAP/PAP-1018.pdf?utm](https://www.usbr.gov/tsc/techreferences/hydraulics_lab/pubs/PAP/PAP-1018.pdf?utm)
28. Vyshnevskiy, V., Shevchuk, S., Komorin, V., Oleynik, Y., & Gleick, P. (2023). The destruction of the Kakhovka dam and its consequences. *Water International*, 48(5), 631-647. DOI: <https://doi.org/10.1080/02508060.2023.2247679>

29. Costa, J.E., 1985. Floods from Dam Failures, U.S. Geological Survey Open-File Report 85-560, Denver, Colorado, 54 p.
30. Хільчевський В.К., Забокрицька М.Р., Стельмах В.Ю. (2023). Гідроекологічні аспекти водопостачання та водовідведення: навч. посібник. – К.: ДІА, 228 с. URL: <https://www.researchgate.net/publication/372290011>
31. Стельмах, В. Ю., & Мельнійчук, М. М. (2022). Гідрографія України. URL: <https://evnuir.vnu.edu.ua/handle/123456789/20895>
32. Хільчевський, В. К. (2022). Особливості гідрографії Європи: річки, озера, водосховища. Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія, (4), 66. URL: <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2022.4.1>
33. Хільчевський, В. К., & Гребінь, В. В. (2021). Великі і малі водосховища України: регіональні та басейнові особливості поширення. Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія, (2), 60. URL: [http://www.library.univ.kiev.ua/ukr/host/10.23.10.100/db/ftp/univ/ggg/ggg\\_20\\_21\\_60.pdf#page=6](http://www.library.univ.kiev.ua/ukr/host/10.23.10.100/db/ftp/univ/ggg/ggg_20_21_60.pdf#page=6)
34. Строкаль, В., Ковпак, А. (2022). Воєнні конфлікти та вода: наслідки й ризики. Науково-практичний журнал «Екологічні науки», 5(44), 94-102. URL: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.5-44.14>
35. Water Conference UN-2023. 22-24 March 2023, New York. Internet-resource. URL: <https://sdgs.un.org/conferences/water2023/about>
36. Khilchevskiy V.K. (2022). Water and armed conflicts – classification features: in the world and in Ukraine. Hydrology, hydrochemistry and hydroecology, 1(63), 6-19. URL: <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2022.1.1>
37. Ladyka, M., & Starodubtsev, V. (2022). Water reservoirs and the war in Ukraine: environmental problems. EUREKA: Life Sciences, (6), 36-43. URL: <http://journal.eu-jr.eu/life/article/view/2664>

38. Ukraine conflict environmental briefing. Water (2022). Conflict and Environment Observatory. Internet-resource. URL: <https://ceobs.org/ukraine-conflict-environmental-briefing-water/>
39. Інфографічний довідник «Російсько-українська війна: вплив на довкілля – Russian-Ukraine war: environmental impact» (2023). Internet-resource. URL: <https://www.topleadprojects.com/war-in-ua-environmental-impact-ukr>
40. Ecodozor. Environmental consequences and risks of the fighting in Ukraine (interactive map). The development and maintenance of the information system is supported by Zoï Environment Network (Switzerland), the OSCE Project Coordinator in Ukraine, the REACH humanitarian initiative, and the UN Environment Programme. Internet-resource. URL: [www.ecodozor.org](http://www.ecodozor.org)
41. Ukrainian water infrastructure damage. New @info@nwp.nl from 17 November 2022. The Netherlands Water Partnership (NWP). Internet-resource. URL: <https://www.netherlandswaterpartnership.com/news/ukrainian-water-infrastructure-damage>
42. Стали відомі збитки внаслідок знищення греблі Оскільського водосховища. Новини від 07.07.2022 р.: «Слобідський край». Internet-resource. URL: <https://www.slk.kh.ua/oblast-online/izumskij-rajon/stali-vidomi-zbitki-vnaslidok-znisenna-grebli-oskilskogo-vodoshovisa.html>
43. Водний фонд України: Штучні водойми — водосховища і ставки: Довідник / За ред. В. К. Хільчевського, В. В. Гребеня. — К.: Інтерпрес, 2014. — 164 с.
44. Державне агенство водних ресурсів України. Офіційний сайт. URL: <https://www.davr.gov.ua/>
45. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів. Офіційний сайт. URL: <https://mepr.gov.ua/>.
46. Офіційний сайт Державної служби статистики України. — URL: <http://www.ukrstat.gov.ua>.

47. Інформаційний ресурс Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів «ЕкоЗагроза». URL: <https://ecozagroza.gov.ua/>
48. Паламарчук М. М., Закорчевна Н. Б. Водний фонд України: Довідниковий посібник / За ред. В. М. Хорева, К. А. Алієва. К.: Ніка-Центр, 2001. 392 с.
49. Розробка біологічного обґрунтування та режиму біологічної меліорації Трав'янського водосховища Харківської області, Н.В. Старко, УКРНДІЕП, Харків, 2016
50. Державні санітарно-епідеомологічні правила і норми, затверджені наказом МОЗ України №1602 від 06.09.2022р. (zareestrovano v Міністерстві юстиції України 08 листопада 2022 р. за № 1387/38723). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1387-22#Text>.
51. Наказ Міністерства охорони здоров'я України «Про затвердження Гігієнічних нормативів якості води водних об'єктів для задоволення питних, господарсько-побутових та інших потреб населення» 02.05.2022 № 721, URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0524-22#Text>
52. US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center. Веб-ресурс Центру Гідрологічної Інженерії Інженерного Корпусу Армії США. URL: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>
53. Dam break simulation with HEC-RAS: Chepete proposed dam. Веб-ресурс. URL: [https://sciengsustainability.blogspot.com/2019/03/dam-break-simulation-hec-ras.html#google\\_vignette](https://sciengsustainability.blogspot.com/2019/03/dam-break-simulation-hec-ras.html#google_vignette)
54. Shahid Azam, Qiren Li. Tailings Dam Failures: A Review of the Last One Hundred Years. Geotechnical News December 2010 p. 50. URL: <https://web.archive.org/web/20131126070721/http://www.infomine.com/library/publications/docs/Azam2010.pdf>
55. Основні засади управління якістю водних ресурсів та їхня охорона / За ред. В. К. Хільчевського. — К.: ВПЦ «Київський університет». — 2015. — 154 с.

56. Ладика М. М., Стародубцев В. М. (2023). Екологічні наслідки затоплення долини річки Ірпінь у зимовий період. «Продовольча та екологічна безпека в умовах війни та повоєнної відбудови: виклики для України та світу»: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. Секція 2: Післявоєнне відновлення рослинних ресурсів та екологічна безпека країни (м. Київ, 25 трав. 2023 р.). Київ. С. 156-159
57. Makarenko, N. A., Stokal, V. P., Berezhniak, Y. M., Bondar, V. I., Pavliuk, S. D., Vagaliuk, L. V., ... & Kovpak, A. V. (2022). Вплив російської воєнної агресії на природні ресурси України: аналіз ситуації, методологія оцінювання. Наукові доповіді НУБіП України, (4 (98)).
58. Adani P., Ashok Sawale A., Nandhagopal G. (2022) Bioaccumulation of heavy metals in the food components from water and sediments in the coastal waters of Kalpakkam, Southeast coast of India. Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management, Volume 17. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2021.100627>.
59. Weir D., Darbyshire E. (2022). Ukraine conflict environmental briefing. Water. Conflict and Environment Observatory. URL: <https://ceobs.org/ukraine-conflict-environmental-briefing-water/>. Date accessed: April 01, 2023
60. Russian-Ukraine war: environmental impact. TOP LEAD. Visual Content Solutions. URL: <https://www.topleadprojects.com/war-in-ua-environmental-impact-ukr>; <https://www.kmu.gov.ua/news/yak-viina-vplyvaie-na-dovkillia-ukrainy-ta-ievropy-mindovkillia-z-partneramy-prezentuvalo-pershe-infohrafichne-doslidzhennia>
61. Günther Garbrecht: "Wasserspeicher (Talsperren) in der Antike", Antike Welt, 2nd special edition: Antiker Wasserbau (1986), pp.51–64 (52f.)
62. Earth Explorer. Веб-ресурс. URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/>